

普通高等教育“十三五”规划教材

电子设计系列规划教材

模拟电子技术习题及实验指导 (第2版)

查丽斌 主编

张凤霞 李自勤 胡体玲 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是《模拟电子技术(第2版)》的配套习题集和实验教材。全书共9章,前8章主要内容包括与主教材各章对应的知识要点总结、本章重点与难点、重点分析方法与步骤、填空题和选择题、习题等;第9章包含7个典型实验,除第一个“常用电子仪器的使用”为操作型实验外,其余都是设计型实验,每个实验只给出实验内容和实现电路,不给出具体参数,不针对具体的实验板设计,通用性强。本书配套有习题详解。

本书可作为高等学校本科电子、通信、自动化、电子电气、计算机等专业和部分非电类专业的教材,也可作为自学考试和成人教育的自学教材,还可供电子工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术习题及实验指导/查丽斌主编. —2版. —北京:电子工业出版社,2018.2

ISBN 978-7-121-33728-4

I. ①模… II. ①查… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN710.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 033230 号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:王羽佳 特约编辑:曹剑锋

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:303 千字

版 次:2013 年 1 月第 1 版

2018 年 2 月第 2 版

印 次:2018 年 2 月第 1 次印刷

定 价:28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254535, wyj@phei.com.cn。

前 言

本书是《模拟电子技术（第2版）》的配套用书，可以作为学生的习题册和实验指导书。

近年来为了提高高等学校的教学质量，教育部和各高校都投入了很大的力量，采取了很多有效措施。为了提高“模拟电子技术”课程的教学质量，除要求学生在课堂上认真听讲外，还必须要求学生在课外多做练习，认真完成作业，同时加强实践性环节的训练。本书正是在这样的背景下为满足教学需求而编写的。

本书共9章，前8章对应主教材的内容，即运算放大器及其线性应用、半导体二极管及直流稳压电源、晶体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路与模拟集成运算放大器单元电路、滤波电路及放大电路的频率响应、负反馈放大电路和波形产生电路等，每章包括知识要点总结、重点与难点、重点分析方法与步骤、填空题和选择题、习题等5部分内容。其中，知识要点总结、重点与难点、重点分析方法等内容，可帮助学生在完成课后作业前，系统地复习和总结每章的内容；填空题和选择题是对主教材内容的补充，有助于学生对基本概念的理解和掌握。第9章包含7个典型实验，除“常用电子仪器的使用”为操作型实验外，其余均为设计型实验，每个实验都给出了实验内容和实验电路的设计方法，不给出具体参数，不针对具体的实验板设计，通用性较强。每个实验需要3~4学时，可以满足实验学时数在26学时以下的教学要求。

学生使用本书，可以省去抄题目和画图的时间，从而可以把更多的精力投入到题目的思考上，提高学习效率。交作业时，沿虚线撕下即可，建议每章交一次作业，内容较多的章节可以交两次作业。对于教师，本书可以减轻收发大量作业本的负担，提高批改作业的效率，从而可以把更多的精力投入到教学中。

本书向教师免费提供习题参考答案和实验参考结果，请登录华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn> 注册下载。

本书由查丽斌策划、组织和统稿，第1~6章由查丽斌编写，第7章由张凤霞编写，第8章由李自勤编写，第9章由胡体玲编写，汪洁、王宛苹和王勇佳也参与了本书的编写工作。在本书的编写过程中，许多本校和兄弟院校的教师都提出了诸多中肯的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢！

在本书的编写过程中，参考了一些已经出版的教材和文献，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平有限且编写时间仓促，书中难免存在错误和不妥之处，诚恳地希望读者提出宝贵的意见和建议，以便今后不断改进。

作 者

2018年1月

目 录

第 1 章 运算放大器及其线性应用	1	第 3 章 晶体三极管及其基本放大电路	31
1.1 知识要点总结	1	3.1 知识要点总结	31
一、放大的基本概念及性能指标	1	一、晶体三极管的基本知识	31
二、模拟集成运算放大器的组成及特点	1	二、晶体管放大电路的 3 种接法	32
三、理想集成运算放大电路	1	3.2 本章重点与难点	32
四、基本运算电路	2	3.3 重点分析方法与步骤	32
1.2 本章重点与难点	2	一、三极管引脚及类型判别	32
1.3 重点分析方法与步骤	2	二、三极管的工作状态判别	33
1.4 填空题和选择题	4	三、放大电路有无放大作用判别	33
1.5 习题 1	5	四、三极管放大电路分析方法	33
第 2 章 半导体二极管及直流稳压电源	15	五、放大电路的非线性失真	35
2.1 知识要点总结	15	3.4 填空题和选择题	36
一、半导体的基本知识	15	3.5 习题 3	39
二、PN 结的特性	15	第 4 章 场效应管及其基本放大电路	51
三、晶体二极管模型	15	4.1 知识要点总结	51
四、直流稳压电源	16	一、场效应管的基本知识	51
2.2 本章重点与难点	17	二、场效应管伏安特性曲线	51
2.3 重点分析方法与步骤	17	三、放大模式下场效应管的模型	52
一、二极管电路的简化分析法	17	4.2 本章重点与难点	52
二、稳压管稳压电路的分析	17	4.3 重点分析方法与步骤	53
三、整流电路分析	17	一、场效应管类型判别	53
2.4 填空题和选择题	18	二、场效应管的工作状态判别	53
2.5 习题 2	21	三、场效应管放大电路分析	53

4.4	填空题和选择题	55
4.5	习题 4	57
第 5 章	多级放大电路与集成运算放大器单元电路	67
5.1	知识要点总结	67
	一、多级放大电路	67
	二、电流源电路	67
	三、差分式放大电路	67
	四、功率放大电路	68
5.2	本章重点与难点	70
5.3	重点分析方法与步骤	70
	一、多级放大电路性能分析	70
	二、差分放大电路的半电路分析法	71
5.4	填空题和选择题	72
5.5	习题 5	75
第 6 章	滤波电路及放大电路的频率响应	85
6.1	知识要点总结	85
	一、滤波电路的基本知识	85
	二、无源 RC 滤波电路的频率响应	85
	三、有源滤波器的实现	85
	四、放大电路的频率响应	85
6.2	本章重点与难点	87
6.3	重点分析方法与步骤	88
	一、频率响应分析步骤	88
	二、放大电路的频率特性分析方法	88
6.4	填空题和选择题	89
6.5	习题 6	91

第 7 章	负反馈放大电路	101
7.1	知识要点总结	101
	一、反馈的基本概念	101
	二、负反馈对放大电路性能的影响	102
	三、负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作的条件	102
7.2	本章内容的重点及难点	102
7.3	重点分析方法及步骤	102
	一、判别反馈的方法	102
	二、深度负反馈条件下 A_{uf} 的估算	103
7.4	填空题和选择题	103
7.5	习题 7	105
第 8 章	波形产生电路	113
8.1	知识要点总结	113
	一、正弦波产生电路	113
	二、RC 文氏桥正弦波振荡电路	113
	三、LC 正弦波振荡电路	114
	四、石英晶体振荡器	114
	五、非正弦波产生电路	115
8.2	本章重点与难点	115
8.3	重点分析方法与步骤	115
8.4	填空题和选择题	116
8.5	习题 8	117
第 9 章	实验	125
9.1	常用电子仪器的使用	125
	一、实验目的	125
	二、实验仪器	125
	三、实验原理	125

四、实验内容及步骤	127	六、预习要求	144
五、注意事项	128	七、注意事项	144
六、预习要求	129	八、思考题	144
七、思考题	129	9.5 负反馈放大电路	144
八、实验报告要求	129	一、实验目的	144
9.2 集成运算放大器的线性应用	129	二、实验仪器及元器件	144
一、实验目的	129	三、实验原理	145
二、实验仪器及元器件	129	四、电路参数设计	146
三、实验原理	129	五、实验内容	146
四、实验电路参数设计	132	六、预习要求	148
五、实验内容	132	七、思考题	148
六、注意事项	133	9.6 电平检测器的设计与调测	148
七、预习要求	134	一、实验目的	148
八、思考题	134	二、实验仪器及元器件	148
9.3 二极管极性的判别及直流稳压电源	134	三、实验原理	148
一、实验目的	134	四、实验内容及步骤	150
二、实验仪器及元器件	134	五、预习要求	150
三、实验原理	134	六、注意事项	150
四、实验内容及步骤	136	七、思考题	150
五、预习要求	137	9.7 波形产生电路	151
六、注意事项	138	一、实验目的	151
七、思考题	138	二、实验仪器及元器件	151
9.4 三极管管型的判别及共发射极放大电路	138	三、实验原理	151
一、实验目的	138	四、实验内容及步骤	154
二、实验仪器及元器件	138	五、预习要求	156
三、实验原理	139	六、思考题	156
四、实验设计任务	141	参考文献	157
五、实验内容及步骤	141		

第 1 章 运算放大器及其线性应用

1.1 知识要点总结

一、放大的基本概念及性能指标

1. 放大的基本概念

模拟电子电路是指包含电子管、晶体管、场效应管、运算放大器等有源器件，并完成一定功能的电路。放大是指在有源器件的控制下实现能量的转换。放大电路的功能是将微弱的电信号不失真地放大到所需的值。

2. 放大的模型和性能指标

放大电路可视为双口网络。根据输入和输出量的不同，可将放大电路分为电压放大、电流放大、互阻放大和互导放大 4 种电路形式。

放大电路的性能指标主要包括增益、输入电阻、输出电阻、通频带、非线性失真、功率和效率等。

二、模拟集成运算放大器的组成及特点

1. 模拟集成运算放大器组成

模拟集成运算放大器是高性能的直接耦合集成电压放大电路，通常由输入级、中间级、输出级和偏置电路 4 部分电路组成。

2. 集成运算放大电路的电压传输特性

集成运算放大电路的电压传输特性是指输出电压与输入电压的关系曲线，即 $u_o = f(u_{id})$ ，如图 1.1.1 所示。

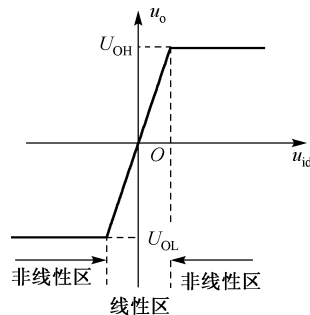


图 1.1.1 集成运放的电压传输特性

三、理想集成运算放大电路

1. 理想集成运算放大电路的特点

所谓理想运放，就是将集成运放的性能指标理想化，即

- (1) 开环电压增益 $A_{od} = \infty$
- (2) 开环输入电阻 $r_{id} = \infty$
- (3) 开环输出电阻 $r_o = 0$
- (4) 转换速率 $S_R = \infty$

一个理想运放可看成是一个电压 u_{id} 控制的受控电压源。

2. 理想集成运算放大电路工作在线性区的特点

当运放工作在线性区，即输出电压与输入电压呈线性关系时，具有两个主要特点。

(1) $u_+ = u_-$ (“虚短”)

(2) $i_- = i_+ = \frac{u_{id}}{r_{id}} \approx 0$ (“虚断”)

“虚短”和“虚断”是两个非常重要的概念，是分析工作在线性区的理想运放应用电路中输入与输出函数关系的基本关系式。集成运放必须引入深度负反馈，才能保证其工作在线性区。工作在线性区的应用电路主要包括运算电路、有源滤波电路等。

3. 理想集成运算放大电路工作在非线性区的特点

当运放工作在非线性区时，具有如下两个主要特点。

(1) $u_o = \begin{cases} U_{OH}, & u_+ > u_- \\ U_{OL}, & u_+ < u_- \end{cases}$

(2) $i_- = i_+ = 0$

四、基本运算电路

理想运放组成的基本运算电路如表 1.1.1 所示。

1.2 本章重点与难点

1. 放大的基本概念和放大电路的性能指标。
2. 集成运放的组成和理想化集成运放的特性。
3. 利用虚短、虚断的概念分析由集成运放组成的各种运算电路。

1.3 重点分析方法与步骤

下面介绍运算电路的分析方法。

1. 利用“虚短”和“虚断”进行分析

(1) 根据电路结构判断运放是否工作在线性区，若除运放外还

有其他的元器件连接输出和反相输入端，则判断运放工作在线性区，可应用“虚短”和“虚断”。

(2) 利用 KCL 列写节点电流方程 $\sum i = 0$ 。注意，不要列写运放输出端所接的节点方程，因为输出电流未知。

(3) 将“虚断” $i_- = i_+ = 0$ 和“虚短” $u_+ = u_-$ 的关系式代入节点电流方程，求运算电压的运算关系式。

2. 利用叠加定理进行分析

由于许多运算电路都是在反相比例电路、同相比例电路或积分电路的基础上发展起来的，所以在分析方法上，除可以采用“虚短”和“虚断”进行分析外，还可以采用叠加定理进行分析，具体分析步骤如下：

(1) 保留其中任一输入电压，令其他输入电压为零。

(2) 利用同相比例电路、反相比例电路或积分电路的基本关系式，求出任一输入电压作用时的输出电压。

(3) 根据电路的“叠加定理”，求出电路总的运算关系。

表 1.1.1 基本运算电路

电路名称	电路结构	基本运算关系
反相比例电路		$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1}$ $R_{if} = R_1, \quad R_{of} = 0$
同相比例电路		$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ $R_{if} = \infty, \quad R_{of} = 0$
反相加法电路		$u_o = -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right)$
同相加法电路		$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_4} \right) (K_1 u_{i1} + K_2 u_{i2} + K_3 u_{i3})$ <p>令 $R = R_1 // R_2 // R_3$, 式中</p> $K_1 = R / R_1$ $K_2 = R / R_2$ $K_3 = R / R_3$

(续表)

电路名称	电路结构	基本运算关系
减法电路		当电阻满足条件 $R_f / R_1 = R_3 / R_2$ 时, $u_o = -\frac{R_f}{R_1} (u_{i1} - u_{i2})$
反相积分电路		$u_o = -\frac{1}{R_1 C_f} \int u_i dt$
反相微分电路		$u_o = -R_f C \frac{du_i}{dt}$

1.4 填空题和选择题

一、填空题

- 1.4.1 放大电路有_____、_____、_____、_____4种电路形式。
- 1.4.2 某放大电路的上、下限截止频率分别为 100kHz 和 20Hz, 则通频带 $f_{BW} \approx$ _____。
- 1.4.3 集成运算放大电路的输入级通常为差分电路, 主要是为了_____。
- 1.4.4 理想集成运放的 $A_{od} =$ _____, 输入电阻 $r_{id} =$ _____, 输出电阻 $r_{od} =$ _____。
- 1.4.5 要实现电压放大倍数 $A_{uf} = 100$ 的放大电路, 应选用_____运算电路, 要将正弦波电压转换成余弦波电压, 应选用_____运算电路。
- 1.4.6 电压跟随器的输出电压 u_o _____ 输入电压 u_i , 即电压增益 $A_{uf} =$ _____。
- 1.4.7 一个放大电路的中频增益为 60dB, 则在截止频率处, 实际的增益为_____dB。
- 1.4.8 _____比例运算电路中, 运放的反相输入端为虚地, 而_____比例运算电路中, 运放的两个输入端对地电压基本等于输入电压。
- 1.4.9 _____比例运算电路的特例是电压跟随器, 它具有输入电阻大和输出电阻小的特点, 常用做缓冲器。
- 1.4.10 流过_____求和电路反馈电阻的电流等于各输入电流的代数和。

二、选择正确的答案填空

- 1.4.11 与工作在非线性工作状态的运放不同, 运算电路中的运放通常工作在_____。
- A. 开环 B. 深度负反馈状态 C. 正反馈状态
- 1.4.12 将三角波电压转换为方波电压可选用_____。
- A. 反比例电路 B. 微分电路
C. 积分电路 D. 同比例电路
- 1.4.13 当集成运放工作在线性放大状态时, 可运用_____两个重要的概念。
- A. 开环和闭环 B. 虚短和虚断
C. 虚短和虚地 D. 线性和非线性
- 1.4.14 某放大电路在负载开路时的输出电压为 4V, 接入 12k Ω 的负载电阻后, 输出电压降为 3V, 则放大电路的输出电阻为_____。
- A. 10k Ω B. 4k Ω C. 3k Ω D. 2k Ω
- 1.4.15 某放大电路负载开路时, 输出电压为 4V, 负载短路时, 输出电流为 10mA, 则该电路的输出电阻为_____。
- A. 200 Ω B. 300 Ω C. 400 Ω D. 500 Ω
- 1.4.16 实现 $u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$ 的运算, 应采用_____运算电路。
- A. 反比例 B. 反相积分 C. 减法 D. 反相加法
- 1.4.17 集成运算放大器实质上是一种_____。
- A. 高增益的直接耦合电压放大器
B. 高增益的阻容耦合电压放大器
C. 高增益的直接耦合电流放大器
D. 高增益的阻容耦合电流放大器

1.5 习题 1

1.5.1 当负载开路 ($R_L = \infty$) 时测得放大电路的输出电压 $u'_o = 2\text{V}$, 当输出端接入 $R_L = 5.1\text{k}\Omega$ 的负载时, 输出电压下降为 $u_o = 1.2\text{V}$, 求放大电路的输出电阻 R_o 。

解:

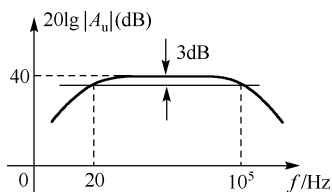
1.5.2 当在放大电路的输入端接入电压 $u_s = 15\text{mV}$, 内阻 $R_s = 1\text{k}\Omega$ 的信号源时, 测得电路的输入端的电压为 $u_i = 10\text{mV}$, 求放大电路的输入电阻 R_i 。

解:

1.5.3 当在电压放大电路的输入端接入电压 $u_s = 15\text{mV}$, 内阻 $R_s = 1\text{k}\Omega$ 的信号源时, 测得电路的输入端的电压为 $u_i = 10\text{mV}$; 放大电路输出端接 $R_L = 3\text{k}\Omega$ 的负载, 测得输出电压为 $u_o = 1.5\text{V}$, 试计算该放大电路的电压增益 A_u 和电流增益 A_i , 并分别用 dB (分贝) 表示。

解:

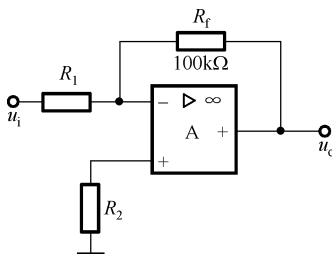
1.5.4 某放大电路的幅频响应特性曲线如图 1.5.1 所示, 试求电路的中频增益 A_{um} 、下限截止频率 f_L 、上限截止频率 f_H 和通频带 f_{BW} 。



解:

图 1.5.1 习题 1.5.4 电路图

1.5.5 电路如图 1.5.2 所示, 当输入电压为 0.4V 时, 要求输出电压为 4V , 试求解 R_1 和 R_2 的阻值。



解:

图 1.5.2 习题 1.5.5 电路图

1.5.6 集成运算放大器工作在线性区和非线性区各有什么特点。

解:

1.5.7 电路如图 1.5.3 所示, 集成运放输出电压的最大幅值为 $\pm 14\text{V}$, 求输入电压 u_i 分别为 200mV 和 2V 时输出电压 u_o 的值。

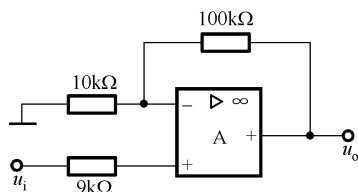
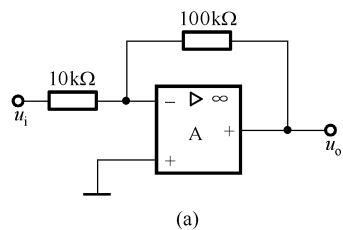


图 1.5.3 习题 1.5.7 电路图

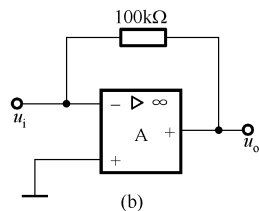
解:

1.5.8 电路如图 1.5.4 所示, 试求每个电路的电压增益 $A_{uf} = \frac{u_o}{u_i}$ 、输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o 。

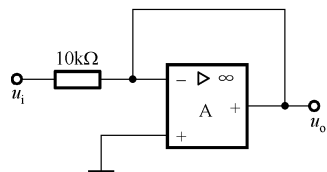


解:

图 1.5.4 习题 1.5.8 电路图



(b)

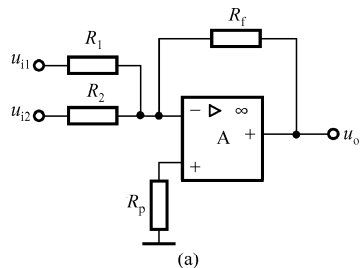


(c)

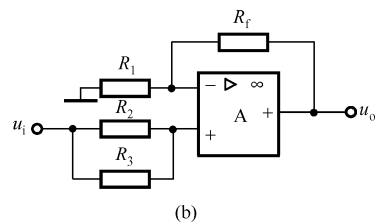
图 1.5.4 习题 1.5.8 电路图 (续)

1.5.9 电路如图 1.5.5 所示, 求输出电压 u_o 与各输入电压的运算关系式。

解:



(a)



(b)

图 1.5.5 习题 1.5.9 电路图

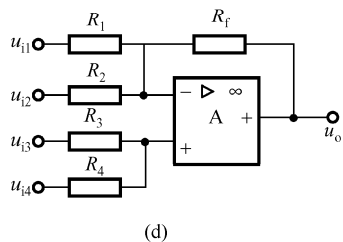
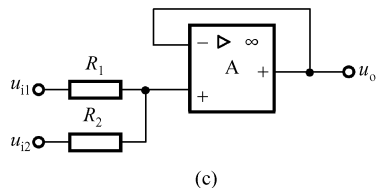


图 1.5.5 习题 1.5.9 电路图 (续)

1.5.10 电路如图 1.5.6 所示, 假设运放是理想的: (1) 写出输出电压 u_o 的表达式, 并求出 u_o 的值; (2) 说明运放 A_1 和 A_2 各组成何种基本运算电路。

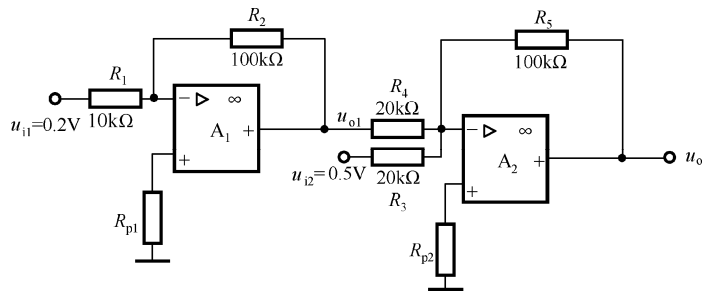


图 1.5.6 习题 1.5.10 电路图

解:

1.5.11 采用一片集成运放设计一个反相加法电路, 要求关系式为 $u_o = -5(u_{i1} + 5u_{i2} + 3u_{i3})$, 并且要求电路中最大的阻值不超过 $100k\Omega$, 试画出电路图, 并计算各阻值。

解:

1.5.12 采用一片集成运放设计一个运算电路, 要求关系式为 $u_o = -10(u_{i1} - u_{i2})$, 并且要求电路中最大的阻值不超过 $200k\Omega$, 试画出电路图, 计算各阻值。

解:

1.5.13 电路如图 1.5.7 所示，设运放是理想的，求输出电压 u_o 的表达式。

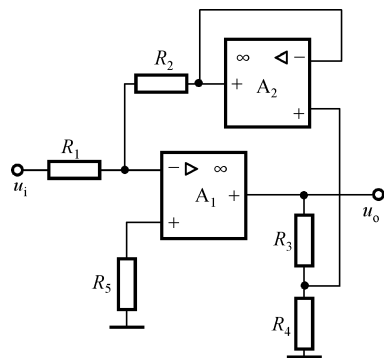


图 1.5.7 习题 1.5.13 电路图

解：

1.5.14 图 1.5.8 所示为带 T 形网络高输入电阻的反相比例运算电路。(1) 试推导输出电压 u_o 的表达式；(2) 若选 $R_1 = 51\text{k}\Omega$, $R_2 = R_3 = 390\text{k}\Omega$, 当 $u_o = -100u_i$ 时，计算电阻 R_4 的阻值；(3) 直接用 R_2 代替 T 形网络，当 $R_1 = 51\text{k}\Omega$, $u_o = -100u_i$ 时，求 R_2 的值；(4) 比较 (2)、(3) 说明该电路的特点。

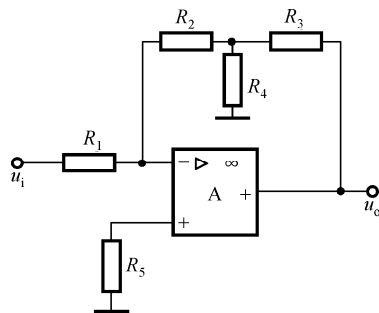


图 1.5.8 习题 1.5.14 电路图

解：

1.5.15 电路如图 1.5.9 所示, 设所有运放都是理想的, 试求:
(1) u_{o1} 、 u_{o2} 、 u_{o3} 及 u_o 的表达式; (2) 当 $R_1 = R_2 = R_3$ 时, u_o 的值。

解:

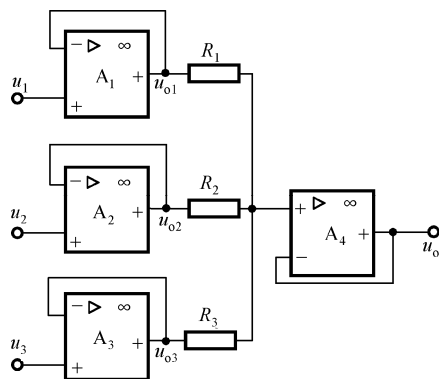


图 1.5.9 习题 1.5.15 电路图

1.5.16 电路如图 1.5.10 所示, 运放均为理想的, 试求电压增益 $A = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}}$ 的表达式。

解:

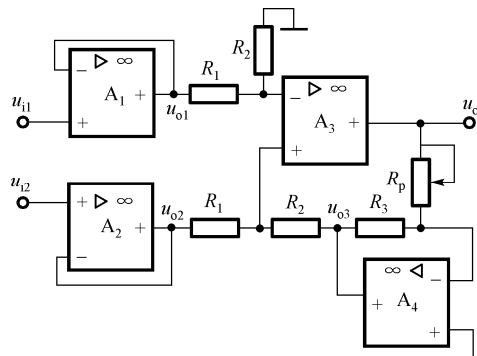


图 1.5.10 习题 1.5.16 电路图

1.5.17 电路如图 1.5.11 所示, 运放均为理想的, 试求输出电压 u_o 的表达式。

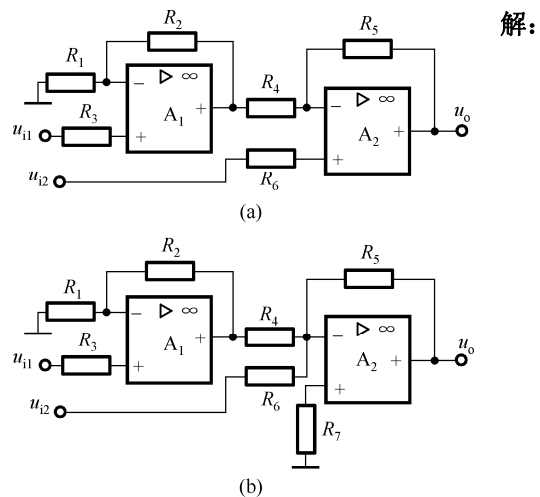


图 1.5.11 习题 1.5.17 电路图

1.5.18 积分电路如图 1.5.12 所示。设 $u_c(0) = 0$ ，在 $t = 0$ 时输入阶跃电压 $u_i = -1V$ ，当 $t = 1ms$ 时，输出电压达到 $10V$ ，求所需的时间常数。

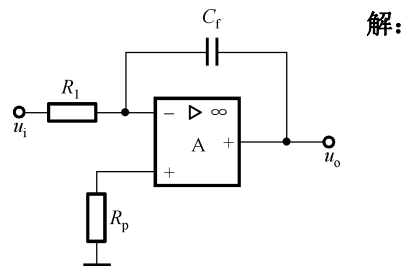


图 1.5.12 习题 1.5.18 电路图

1.5.19 电路如图 1.5.13(a)所示，已知运放的最大输出电压 $U_{om} = \pm 12V$ ，输入电压波形如图 1.5.13(b)所示，周期为 $0.1s$ 。试画出输出电压的波形，并求出输入电压的最大幅值 U_{im} 。

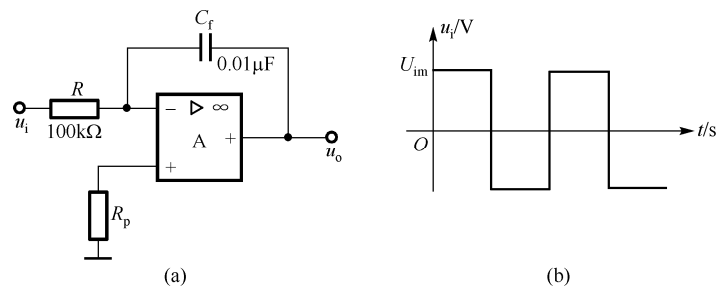


图 1.5.13 习题 1.5.19 电路图

解:

1.5.20 电路如图 1.5.14 所示，运放均为理想的，电容的初始电压为 $u_c(0) = 0$ 。(1) 写出输出电压 u_o 与各输入电压之间的关系式；(2) 当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$ 时，写出输出电压 u_o 的表达式。

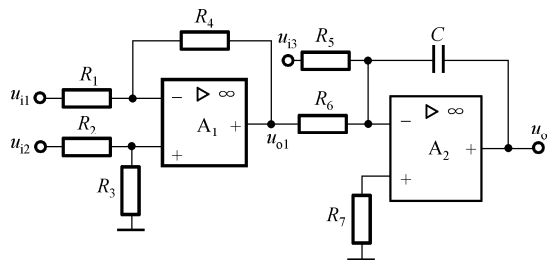


图 1.5.14 习题 1.5.20 电路图

解：

1.5.21 电路如图 1.5.15(a)所示，运放均为理想的。(1) A_1 、 A_2 、和 A_3 各组成何种基本电路；(2) 写出 u_o 的表达式；(3) $R_2 = 100\text{k}\Omega$ ， $C = 10\mu\text{F}$ ，电容的初始电压 $u_c(0) = 0$ ，已知 u_{o1} 的波形如图 1.5.15(b)所示，画出 u_o 的波形。

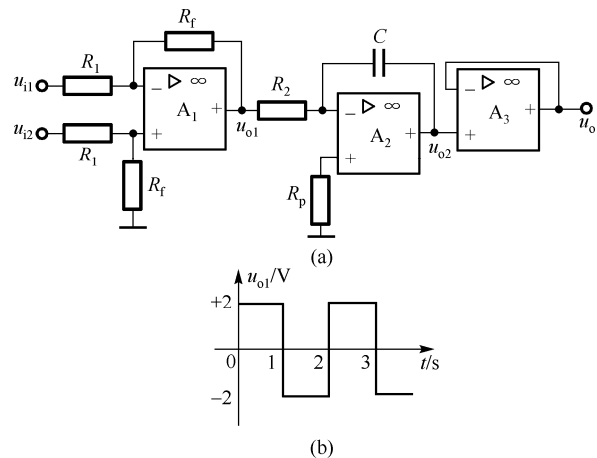


图 1.5.15 习题 1.5.21 电路图

解：

1.5.22 电路如图 1.5.16(a)所示,运放均为理想的,电容的初始值 $u_c(0) = 0$, 输入电压波形如图 1.5.16(b)所示。(1) 写出输出电压 u_o 的表达式;(2) 求 $t=0$ 时 u_{o1} 、 u_o 的值;(3) 画出与 u_i 相对应的 u_{o1} 和 u_o 的波形,并标出相应的幅度。

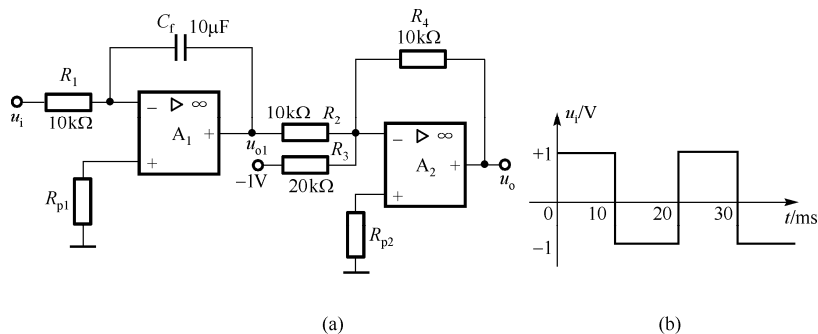


图 1.5.16 习题 1.5.22 电路图

解:

1.5.23 图 1.5.17(a)所示的反相微分电路中,当输入信号 u_i 为对称的三角波时,其波形如图 1.5.17(b)所示,试画出输出信号 u_o 的波形。

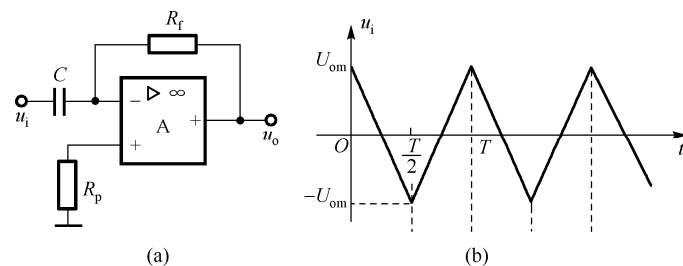


图 1.5.17 习题 1.5.23 电路图

解:

1.5.24 电路如图 1.5.18 所示，运放均为理想的，写出 u_o 与 u_i 的关系式，说明电路的功能。

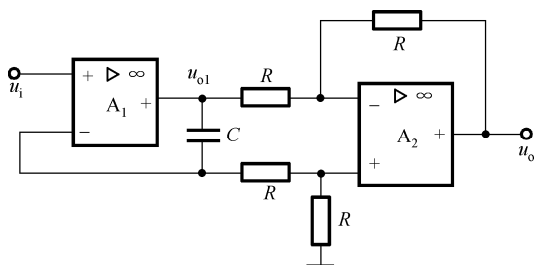


图 1.5.18 习题 1.5.24 电路图

解：

1.5.25 图 1.5.19 为实用的单电源供电的自举式同相交流电压放大电路，假设运算放大器是理想的。已知 $R_1 = R_3 = R_4 = 10\text{k}\Omega$ ， $R_2 = R_5 = 100\text{k}\Omega$ ， $C_1 = C_2 = C_3 = 10\mu\text{F}$ ， $V_{CC} = +15\text{V}$ 。问：（1）运算放大器的各信号端口的直流电位是多少？（2）交流放大倍数 u_o / u_i 是多少，输入阻抗 R_i 是多大？

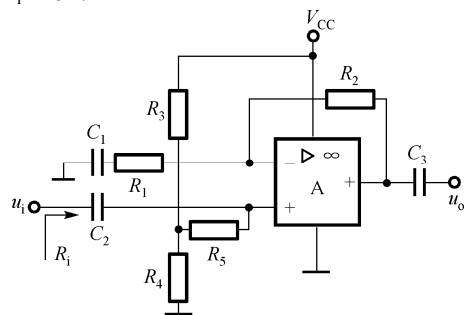


图 1.5.19 习题 1.5.25 电路图

解：

第 2 章 半导体二极管及 直流稳压电源

2.1 知识要点总结

一、半导体的基本知识

常用半导体材料：硅（Si）、锗（Ge）、磷（P）、硼（B）等。

本征半导体：纯净半导体。

半导体中的载流子：空穴和自由电子。

N 型半导体：在四价本征半导体中掺入少量五价元素而形成的杂质半导体。多数载流子为自由电子，少数载流子为空穴。

P 型半导体：在四价本征半导体中掺入少量三价元素而形成的杂质半导体。多数载流子为空穴，少数载流子为自由电子。

二、PN 结的特性

1. 载流子的运动

漂移运动：半导体中的载流子在电场的作用下产生定向运动称为漂移运动，形成漂移电流。

扩散运动：由于浓度差而引起的载流子的定向运动称为扩散运动，形成扩散电流。

2. PN 结的单向导电性

（1）PN 结正向偏置（外加电源正极接 P 区，负极经电阻接 N 区）
内、外电场方向相反→内电场被削弱→阻挡层变薄→有利于多子

的扩散而不利于少子的漂移→扩散运动占优→多子扩散形成较大的正向电流→PN 结导通。

（2）PN 结反向偏置（外加电源正极接 N 区，负极经电阻接 P 区）

内、外电场方向相同→内电场被增强→阻挡层变宽→有利于少子的漂移而不利于多子的扩散→漂移运动占优→少子漂移形成极其微小的反向电流→PN 结截止。反向电流主要受温度影响，与外加反向电压的大小无关，所以又称为反向饱和电流。

3. PN 结的电容效应

（1）势垒电容 C_T ：势垒区内空间电荷量随外加电压变化而产生的电容效应。

（2）扩散电容 C_D ：阻挡层外中性区储存的非平衡电荷量随电压变化而产生的电容效应。

PN 结的总电容 $C_J = C_T + C_D$ ，一般很小，只有在高频交流信号作用下才需要考虑。当 PN 结正向偏置时， C_D 起主要作用；当 PN 结反向偏置时， C_T 起主要作用。

三、晶体二极管模型

1. 数学模型

二极管的伏安特性方程近似为 $i = I_s (e^{u/U_T} - 1)$

2. 曲线模型

曲线如图 2.1.1 所示。

（1）正向特性：当外加电压 $u > U_{th}$ 时，随 u 的增大，正向电流按指数规律迅速增大，正向电阻很小，二极管处于导通状态。

（2）反向特性：当外加电压 $u < U_{th}$ 时，在一定范围内，近似为常数，反向电阻很大，二极管处于截止状态。

(3) 击穿特性：当反向电压增大到 U_{BR} 时，反向电流急剧增大，二极管被反向击穿。击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

U_{th} 为死区电压，室温下，硅管约为 0.5V，锗管约为 0.1V。

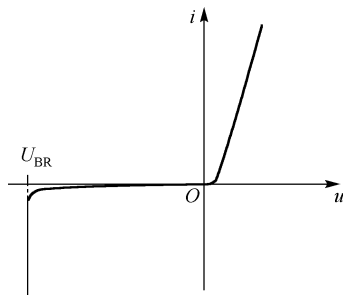


图 2.1.1 二极管伏安特性曲线

3. 简化电路模型

(1) 理想二极管模型： $u > 0$ 时，二极管导通，正向压降为 0，相当于短路； $u < 0$ 时，二极管截止，电阻为 ∞ ，反向电流为 0，相当于开路。

(2) 恒压降模型： $u > U_{D(on)}$ 时，二极管导通，正向压降恒等于 $U_{D(on)}$ ； $u < U_{D(on)}$ 时，二极管截止，反向电流为 0，相当于开路。

(3) 折线模型： $u > U_{th}$ 时，二极管导通，电压与电流成线性关系； $u < U_{th}$ 时，二极管截止，反向电流为 0，相当于开路。

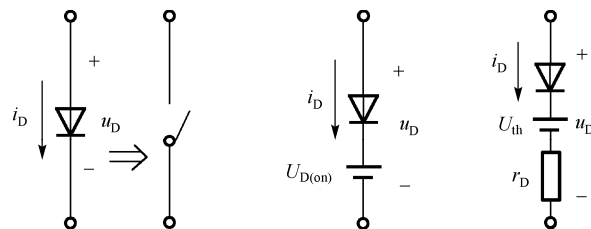
$U_{D(on)}$ 为导通电压，不同于死区电压，是指正向电流明显增大时所对应的电压值。工程上，一般硅管约为 0.7V，锗管约为 0.3V。

二极管 3 种模型的等效电路如图 2.1.2 所示。晶体管的 3 种简化模型被用来计算二极管上加特定范围内电压或电流时的响应。

4. 小信号电路模型

交流小信号等效模型被用来计算叠加在静态工作点上微小增量电压或电流的响应，二极管可以等效为一个动态电阻：

$$r_d \approx \frac{U_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})} \quad (\text{室温下, } T = 300\text{K 时})$$



(a) 理想二极管等效电路 (b) 恒压降模型等效电路 (c) 折线模型等效电路

图 2.1.2 二极管 3 种模型的等效电路

四、直流稳压电源

1. 组成：变压器、整流电路、滤波电路和稳压电路。
2. 二极管整流电路性能指标比较如表 2.1.1 所示。

表 2.1.1 单相半波整流与桥式整流的比较（输入电压 u_1 的有效值为 U ）

	输出电压的平均值 $U_{o(AV)}$	输出电流平均值 $I_{o(AV)}$	通过二极管的平均电流 $I_{D(AV)}$	二极管承受的最高反向电压 $U_{D(RM)}$
半波整流	$0.45U$	$0.45 \frac{U}{R_L}$	$I_{o(AV)}$	$\sqrt{2}U$
单相桥式整流	$0.9U$	$0.9 \frac{U}{R_L}$	$\frac{1}{2} I_{o(AV)}$	$\sqrt{2}U$

3. 电容滤波： $U_{o(AV)} = (1.1 \sim 1.4)U$ ，一般工程上取 $U_{o(AV)} \approx 1.2U$ 。

4. 稳压管稳压

分析稳压管的工作状态：

稳压管极性 $\left\{ \begin{array}{l} \text{正偏} \rightarrow \text{导通} \rightarrow U_o = U_{D(on)} \\ \text{反偏} \left\{ \begin{array}{l} \text{偏压} < \text{稳压值} \rightarrow \text{反向截止} \\ \text{偏压} > \text{稳压值} \rightarrow \text{反向击穿} \rightarrow I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax} \rightarrow \text{稳压状态} \end{array} \right. \end{array} \right.$

5. 三端集成稳压器

$\left\{ \begin{array}{l} \text{固定式} \left\{ \begin{array}{l} \text{输入端} \\ \text{输出端} \\ \text{公共端} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{正电压固定78系列} \\ \text{负电压固定79系列} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{可通过外接电路使输出电压可调} \end{array} \right. \\ \text{可调式} \left\{ \begin{array}{l} \text{输入端} \\ \text{输出端} \\ \text{调整端} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{正电压可调117系列} \\ \text{负电压可调137系列} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{基准电压为1.25V} \\ \text{依靠外接电阻调节输出电压} \end{array} \right. \end{array} \right.$

2.2 本章重点与难点

1. PN 结的单向导电性、伏安特性。
2. 二极管的数学模型、曲线模型、简化电路模型。
3. 二极管电路的简化分析法、小信号分析法，用简化分析法分析各种功能电路。
4. 整流电路的工作原理及元器件参数的选择。
5. 稳压电路的工作原理及计算。
6. 集成稳压器的应用。

2.3 重点分析方法与步骤

一、二极管电路的简化分析法

简化分析法是将电路中的二极管用简化电路模型代替，利用得到的简化电路直接分析、求解。一般，在利用二极管单向导电性的电路

中常用这种方法分析直流电压、电流，也常根据输入信号波形画出输出波形。

分析步骤如下：

1. 判断二极管是导通还是截止。方法是，首先假设二极管断开，求解二极管阳极与阴极之间将承受的电压。若该电压大于导通电压（对理想二极管只要大于 0），则接上二极管后，该管导通；反之，二极管截止。

如果电路中出现两个以上二极管承受大小不相等的正向电压时，则应判定承受正向电压较大者优先导通，将优先导通的二极管接入电路中，重新分析其他二极管的工作状态。

2. 画出等效电路，利用上述分析结果，将截止的二极管开路，导通的二极管用简化模型的等效电路代替，具体选用哪种模型，应根据电路中电源电压的大小以及要求精度来选择。

3. 利用等效电路求解待求量或画出输出波形。

二、稳压管稳压电路的分析

稳压管稳压电路的分析方法与二极管电路的分析方法相同，但稳压管必须被反向击穿，击穿的条件是在稳压管断开时，求得的阴极与阳极之间的电压应大于其稳定电压。

对于集成稳压电路的分析主要搞清楚稳压器型号与输出电压的关系。

三、整流电路分析

整流电路中由于电源电压一般较高，所以一般选用理想二极管模型或恒压降模型来分析，画出输出波形，求输出电压、电流平均值并选择二极管。

2.4 填空题和选择题

一、填空题

2.4.1 在本征半导体中加入_____价元素可形成 N 型半导体，加入_____价元素可形成 P 型半导体。N 型半导体中_____是多数载流子，_____是少数载流子；P 型半导体中_____是多数载流子，_____是少数载流子。

2.4.2 PN 结内部载流子的定向运动有两种形式，一种是由电场作用而导致载流子的运动，称为_____运动，另一种由载流子的浓度差而产生，称为_____运动。

2.4.3 PN 结的单向导电性为：外加正向电压时_____，外加反向电压时_____。PN 结的伏安特性表达式为_____。

2.4.4 给半导体 PN 结加正向电压时，电源的正极应接半导体的_____区，电源的负极通过电阻接半导体的_____区。

2.4.5 在外加直流电压时，理想二极管正向导通电阻为_____，反向截止电阻为_____。

2.4.6 锗二极管导通时的正向压降约为_____V，硅二极管导通时的正向压降为_____V。

2.4.7 在同一测试电路中，分别测得 A、B 和 C 这 3 个二极管的电流如表 2.4.1 所示，性能最好的二极管是_____。

表 2.4.1 题 2.4.7 表

管号	加 0.5V 正向电压时的电流	加反向电压时的电流
A	0.5mA	1 μ A
B	5mA	0.1 μ A
C	2mA	5 μ A

2.4.8 直流稳压电源主要由电源变压器、_____、_____和稳压电路等 4 部分组成。

2.4.9 不加滤波器的由理想二极管组成的单相桥式整流电路的输出电压平均值为 9V，则输入正弦电压有效值应为_____。

2.4.10 图 2.4.1 所示电路是一个用三端集成稳压器组成的直流稳压电路，电路中 C_1 的作用是_____， C_2 的作用是_____，电路在正常工作时的输出电压值 U_o 为_____。

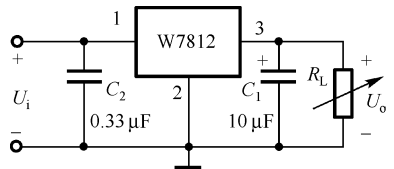


图 2.4.1 题 2.4.10 图

二、选择正确的答案填空

2.4.11 PN 结加适量反向电压时，空间电荷区将_____。
A. 变宽 B. 变窄 C. 不变 D. 消失

2.4.12 当温度升高时，二极管的反向饱和电流将_____。
A. 不变 B. 增大 C. 减小

2.4.13 稳压管工作在稳压区时，其工作状态为_____。
A. 正向导通 B. 反向截止 C. 反向击穿

2.4.14 电路如图 2.4.2 所示， VD_1 和 VD_2 两个二极管为理想元件，A 节点电位为_____。
A. 4V B. -1V C. 0V D. 3V

2.4.15 二极管整流电路利用了半导体二极管_____。
A. 电流放大特性 B. 电压放大特性
C. 单向导电的特性 D. 反向击穿的特性

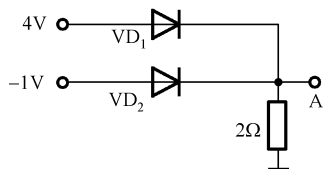


图 2.4.2 题 2.4.14 图

2.4.16 将交流电变为直流电的电路称为_____。

- A. 稳压电路 B. 滤波电路
C. 整流电路 D. 放大电路

2.4.17 在图 2.4.3 所示电路中:

(1) 桥式整流电路中输出电流的平均值 I_o 是_____。

- A. $0.45 \frac{U}{R_L}$ B. $0.9 \frac{U}{R_L}$ C. $0.9 \frac{U_o}{R_L}$ D. $0.45 \frac{U_o}{R_L}$

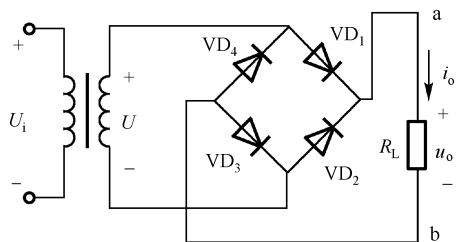


图 2.4.3 题 2.4.17 图

(2) 流过每个整流管的电流为_____。

- A. $I_o / 4$ B. $I_o / 2$ C. $4I_o$ D. I_o

(3) 每个二极管的最大反向电压 $U_{D(RM)}$ 为_____。

- A. $\frac{\sqrt{2}}{2}U$ B. $\sqrt{2}U$ C. $2\sqrt{2}U$ D. $4\sqrt{2}U$

(4) 若 VD_1 的正负极性接反, 则 u_o 的波形_____; 若 VD_1 开路, 则输出_____。

- A. 只有半周波形 B. 全波整流波形
C. 无波形且变压器或整流管损坏 D. 仍可正常工作

(5) 在桥式整流电路中接入电容 C 滤波后, 输出的直流电压较没有接入 C 时_____; 二极管的导通角_____。

- A. 变大 B. 变小 C. 不变

2.4.18 对半导体而言, 其正确的说法是_____。

- A. P 型半导体中由于多数载流子为空穴, 所以它带正电
B. N 型半导体中由于多数载流子为自由电子, 所以它带负电
C. P 型半导体和 N 型半导体本身都不带电

2.4.19 在图 2.4.4 所示稳压电路中, 已知 $U_i=10V$, $U_o=5V$,

$I_Z=10mA$, $R_L=500\Omega$, 则限流电阻 R 应为_____。

- A. 1000Ω B. 500Ω C. 250Ω

2.4.20 在图 2.4.5 所示稳压电路中, 已知 $U_Z=6V$, 则 U_o

为_____。

- A. 6V B. 15V C. 21V

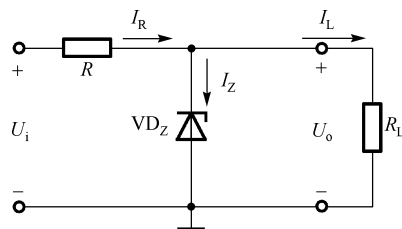


图 2.4.4 题 2.4.19 图

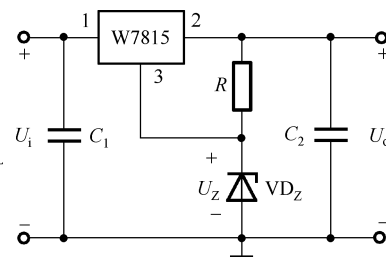


图 2.4.5 题 2.4.20 图

2.5 习题 2

2.5.1 电路如图 2.5.1 所示, $R = 1\text{k}\Omega$, 测得 $U_D = 5\text{V}$, 试问二极管 VD 是否良好 (设外电路无虚焊)?

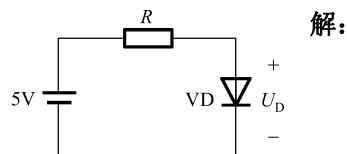


图 2.5.1 习题 2.5.1 电路图

2.5.2 电路如图 2.5.2 所示。已知直流电源的端电压 $U = 5\text{V}$, 测得 $I = 1\text{mA}$, 若将直流电源的电压 U 提高到 10V , 试问这时的 I 是等于、大于还是小于 2mA ?

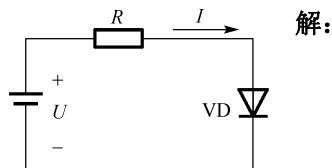


图 2.5.2 习题 2.5.2 电路图

2.5.3 分析判断图 2.5.3 所示各电路中二极管是导通还是截止, 并计算电压 U_{ab} , 设图中的二极管都是理想的。

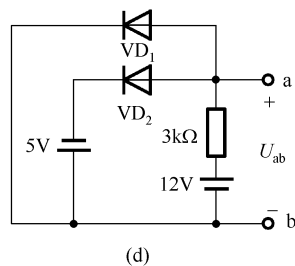
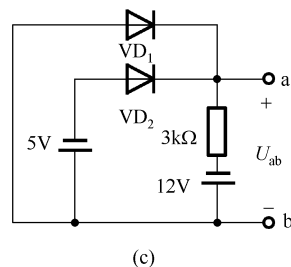
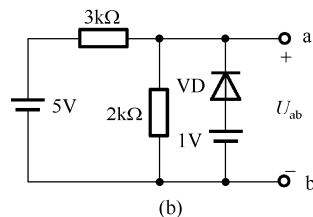
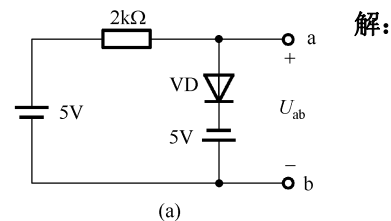


图 2.5.3 习题 2.5.3 电路图

2.5.4 一个无标记的二极管，分别用 a 和 b 表示其两只引脚，利用模拟万用表测量其电阻。当红表笔接 a，黑表笔接 b 时，测得电阻值为 500Ω 。当红表笔接 b，黑表笔接 a 时，测得电阻值为 $100k\Omega$ 。问哪一端是二极管阳极？

解：

2.5.5 用指针式万用表的不同量程测同一只二极管的正向电阻值，其测试结果不一样，为什么？

解：

2.5.6 二极管电路如图 2.5.4(a)所示，设输入电压 $u_i(t)$ 波形如图 2.5.4(b)所示，在 $0 < t < 5ms$ 的时间间隔内，试画出输出电压 $u_o(t)$ 的波形，设二极管是理想的。

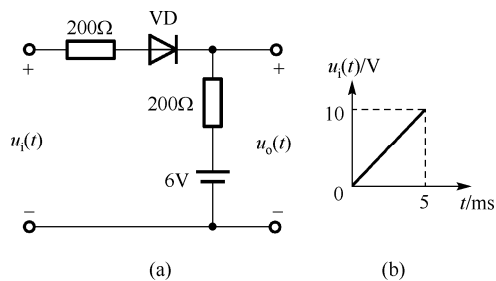


图 2.5.4 习题 2.5.6 电路图

2.5.7 电路如图 2.5.5 所示，二极管导通电压 $U_{D(on)}$ 约为 $0.7V$ ，试分别估算开关断开和闭合时输出电压 U_o 的数值。

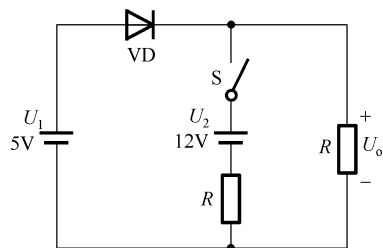


图 2.5.5 习题 2.5.7 电路图

2.5.8 在图 2.5.6 所示的电路中，设二极管为理想的，已知 $u_i = 30 \sin \omega t (\text{V})$ ，试分别画出输出电压 u_o 的波形，并标出幅值。

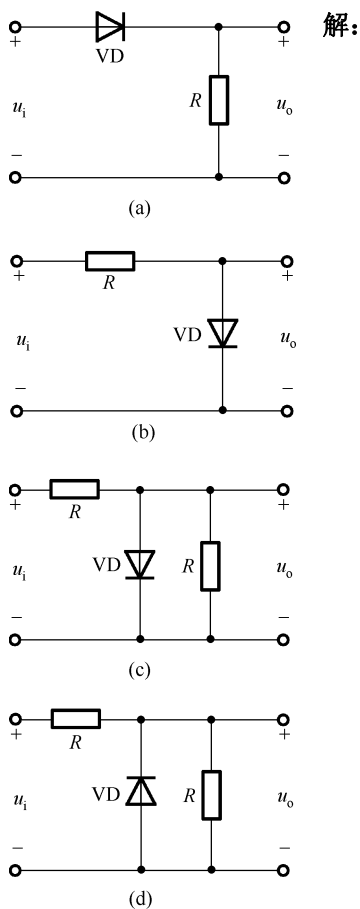


图 2.5.6 习题 2.5.8 电路图

2.5.9 在图 2.5.7 所示电路中，输入电压 $u_i = 10 \sin \omega t (\text{V})$ ，设二极管为理想的，试画出输出电压 u_o 的波形。

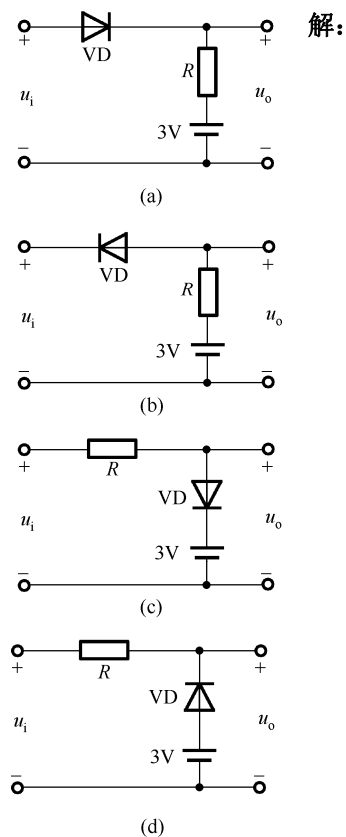


图 2.5.7 习题 2.5.9 电路图

2.5.10 图 2.5.8 所示电路中, 设二极管为理想的, $u_i = 6\sin\omega t(\text{V})$, 试画出输出电压 u_o 的波形以及电压传输特性。

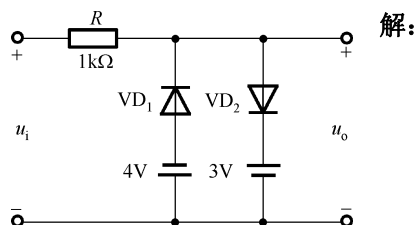


图 2.5.8 习题 2.5.10 电路图

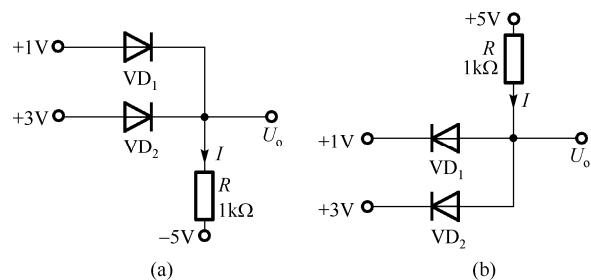


图 2.5.9 习题 2.5.11 电路图

解:

2.5.12 电路如图 2.5.10 所示, 输入电压 $u_i = 10\sin\omega t(\text{mV})$, 设二极管的正向导通电压为 0.7V , 电容 C_1 和 C_2 的容量足够大, 对信号可视为短路。

- (1) 画出直流等效电路和交流等效电路;
- (2) 求输出电压 u_o 。

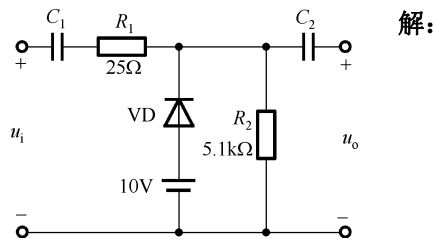


图 2.5.10 习题 2.5.12 电路图

2.5.11 图 2.5.9 所示电路中, 设二极管是理想的, 求图中标记的电压和电流值。

2.5.13 在图 2.5.11 所示电路中, 已知输出电压平均值 $U_{o(AV)} = 9V$, 负载 $R_L = 100\Omega$ 。(1) 输入电压的有效值为多少? (2) 设电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ 。选择二极管时, 其最大整流平均电流 I_F 和最高反向工作电压 U_R 的下限值约为多少?

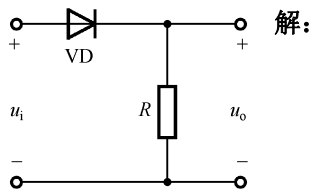


图 2.5.11 习题 2.5.13 电路图

2.5.14 在图 2.5.12 所示的电路中, 电源 $u_i = 100\sin\omega t(V)$, $R_L = 1k\Omega$, 二极管为理想的。求: (1) R_L 两端的电压平均值; (2) 流过 R_L 的电流平均值; (3) 选择二极管时, 其最大整流平均电流 I_F 和最高反向工作电压 U_R 为多少?

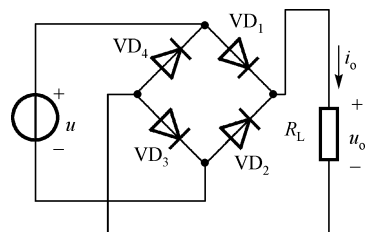


图 2.5.12 习题 2.5.14 电路图

解:

2.5.15 全波整流电路如图 2.5.13 所示, $u_{21} = -u_{22} = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$, 变压器和二二极管均为理想元器件。(1) 画出输出电流 i_o 、输出电压 u_o 和二二极管电压 u_D 的波形; (2) 设 U_2 为已知, 求直流分量 $U_{o(AV)}$ 、 $I_{o(AV)}$ 和二二极管的平均电流 $I_{D(AV)}$ 、承受的反向电压峰值 $U_{D(RM)}$ 。

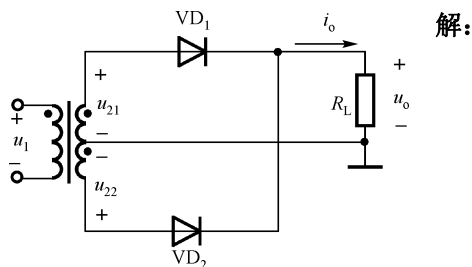


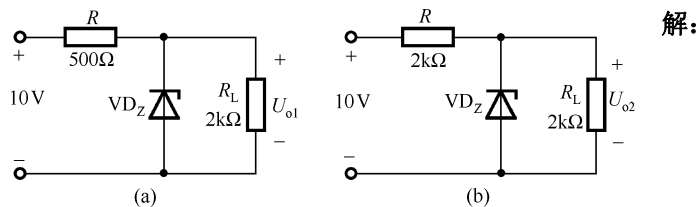
图 2.5.13 习题 2.5.15 电路图

解:

2.5.16 在桥式整流电容滤波电路中, 已知 $R_L = 120\Omega$, $U_{o(AV)} = 30V$, 交流电源频率 $f = 50Hz$ 。选择整流二极管, 并确定滤波电容的容量和耐压值。

解:

2.5.17 已知稳压管的稳压值 $U_Z = 6V$, 稳定电流的最小值 $I_{Zmin} = 4mA$ 。求图 2.5.14 所示电路中的 U_{o1} 和 U_{o2} 。



解:

图 2.5.14 习题 2.5.17 电路图

2.5.18 图 2.5.15 中各电路的稳压管 VD_{Z1} 和 VD_{Z2} 的稳定电压值分别为 8V 和 12V，稳压管正向导通电压 $U_{DZ}=0.7V$ ，最小稳定电流是 5mA。试判断 VD_{Z1} 和 VD_{Z2} 的工作状态并求各电路的输出电压 U_{ab} 。

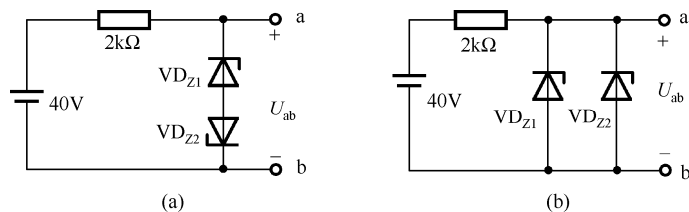


图 2.5.15 习题 2.5.18 电路图

解：

2.5.19 在图 2.5.16 中， $u_i = 16\sin\omega t(V)$ ，所有稳压管均为特性相同的硅稳压管，且稳定电压 $U_Z = 8V$ 。试画出 u_{o1} 和 u_{o2} 的波形。

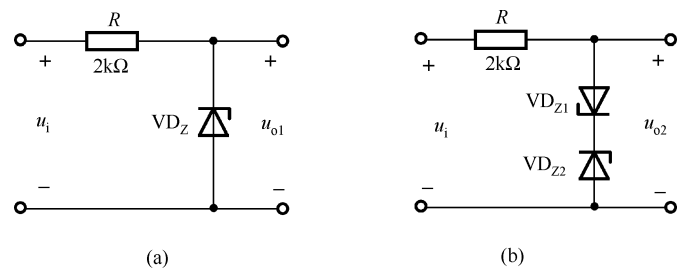


图 2.5.16 习题 2.5.19 电路图

解：

2.5.20 已知稳压管稳压电路如图 2.17 所示，稳压二极管的特性为：稳压电压 $U_Z = 6.8\text{V}$ ， $I_{Z\max} = 10\text{mA}$ ， $I_{Z\min} = 0.2\text{mA}$ ，直流输入电压 $U_i = 10\text{V}$ ，其不稳定性 $\Delta U_i = \pm 1\text{V}$ ， $I_L = 0 \sim 4\text{mA}$ 。试求：

- (1) 直流输出电压 U_o ；
- (2) 为保证稳压管安全工作，限流电阻 R 的最小值；
- (3) 为保证稳压管稳定工作，限流电阻 R 的最大值。

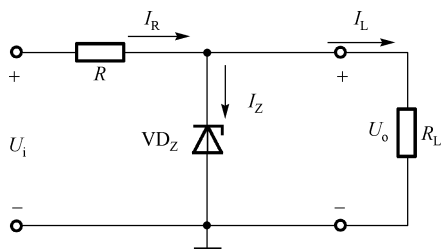


图 2.5.17 习题 2.5.20 电路图

解：

2.5.21 在下面几种情况中，可选用什么型号的三端集成稳压器？

- (1) $U_o = +12\text{V}$ ， R_L 最小值为 15Ω ；
- (2) $U_o = +6\text{V}$ ，最大负载电流 $I_{L\max} = 300\text{mA}$ ；
- (3) $U_o = -15\text{V}$ ，输出电流范围 I_o 为 $10 \sim 80\text{mA}$ 。

解：

2.5.22 电路如图 2.5.18 所示，三端集成稳压器静态电流 $I_W = 6\text{mA}$ ， R_W 为电位器，为了得到 10V 的输出电压，试问应将 R'_W 调到多大？

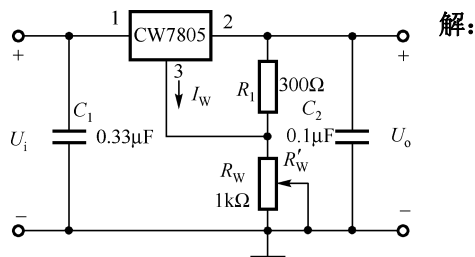


图 2.5.18 习题 2.5.22 电路图

解：

2.5.23 利用 W7805 获得输出电压可调的稳压电源如图 2.5.19 所示，试求输出电压 U_o 的表达式，并计算它的可调范围。

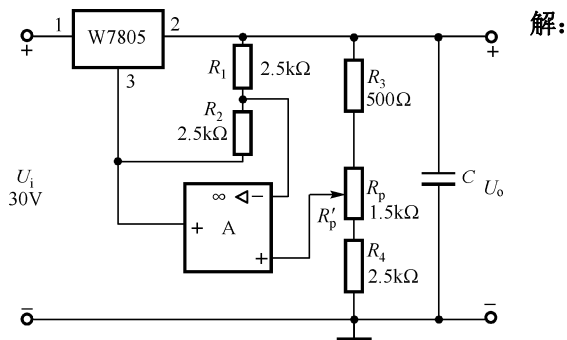


图 2.5.19 习题 2.5.23 电路图

解：

2.5.24 电路如图 2.5.20 所示：(1) 求电路负载电流 I_o 的表达式；
(2) 设输入电压为 $U_i = 24V$ ，W7805 输入端和输出端间的电压最小值为 $3V$ ， $I_o \gg I_w$ ， $R = 50\Omega$ 。求出电路负载电阻 R_L 的最大值。

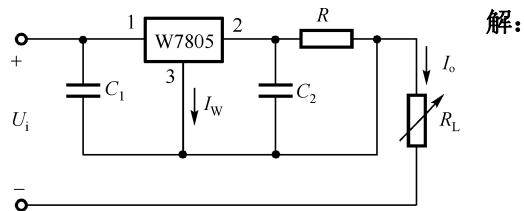


图 2.5.20 习题 2.5.24 电路图

解：

2.5.25 已知三端可调式集成稳压器 W117 的基准电压 $U_{REF} = 1.25V$ ，调整端电流 $I_w = 50\mu A$ ，用它组成的稳压电路如图 2.5.21 所示。(1) 若 $I_1 = 100I_w$ ，忽略 I_w 对 U_o 的影响，要得到 $5V$ 的输出电压，则 R_1 和 R_2 应选取多大；(2) 若 R_2 改为 $0 \sim 2.5k\Omega$ 的可变电阻，求输出电压 U_o 的可调范围。

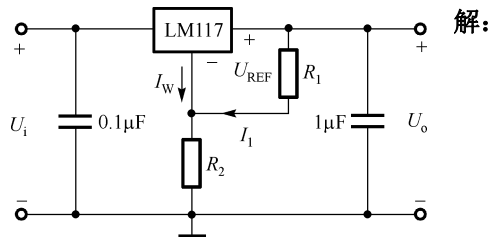
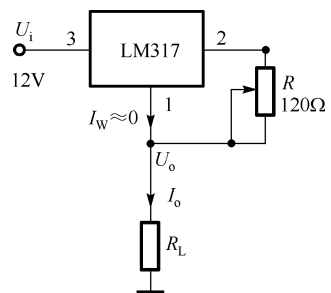


图 2.5.21 习题 2.5.25 电路图

解：

2.5.26 可调恒流源电路如图 2.5.22 所示:(1)当 $U_{21}=U_{REF}=1.2V$, R 值在 $0.8\sim 120\Omega$ 范围内变化时, 恒流电流 I_o 的变化范围如何? (2) 当 R_L 用充电电池代替, 若 $50mA$ 恒流充电, 充电电压 $U_o=1.5V$, 求电阻 R_L 。



解:

图 2.5.22 习题 2.5.26 电路图

第3章 晶体三极管及其基本放大电路

3.1 知识要点总结

一、晶体三极管的基本知识

1. 结构和类型

晶体三极管由3个电极、2个PN结即发射结和集电结结合在一起构成。按结构可分为NPN型和PNP型。

结构上的特点：①发射区高掺杂；②基区很薄；③集电结面积大。

2. 三极管的放大作用

(1) 放大的外部条件：发射结正偏，集电结反偏。

因此，其3个电极的电位关系为：

$$\begin{cases} \text{NPN: } V_C > V_B > V_E \\ \text{PNP: } V_E > V_B > V_C \end{cases}$$

(2) 放大时的电流分配关系：

$$i_E = i_B + i_C \quad (\text{KCL})$$

$$i_C = \beta \cdot i_B, \beta \gg 1$$

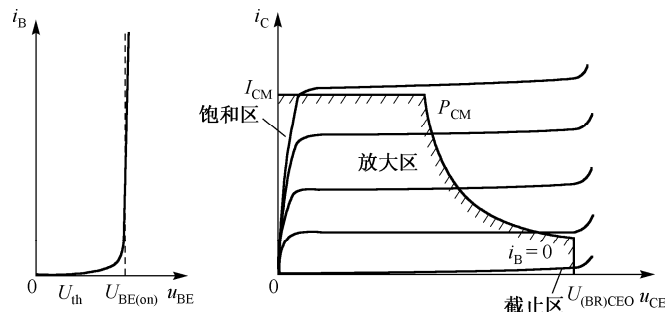
此关系表明了三极管的 i_B 对 i_C 的控制作用和三极管的放大作用。

3. 三极管的共射特性曲线及极限参数

NPN型三极管的共射特性和极限参数如图3.1.1所示。

(1) 输入特性曲线 $i_B = f(u_{BE})|_{u_{CE}=\text{常数}}$

由图3.1.1(a)可见，三极管输入特性存在开启电压 U_{th} ，当 $u_{BE} > U_{th}$ 时才有 i_B 电流产生；当发射结正向导通时，其导通压降 u_{BE} 近似等于一个常数 $U_{BE(on)}$ 。对于NPN的硅三极管， $U_{BE(on)} = 0.7\text{V}$ 左右；对于PNP的锗三极管， $U_{BE(on)} = -0.2 \sim -0.3\text{V}$ 。



(a) 输入特性曲线

(b) 输入特性曲线及极限参数

图 3.1.1 三极管特性曲线及极限参数

(2) 输出特性曲线 $i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$

由图3.1.1(b)可见，三极管的输出特性曲线分为3个区。

① 放大区：特性曲线近似平坦的区域。

工作条件：发射结正偏，集电结反偏，即 $U_{BE} \geq 0.7\text{V}$ ， $U_{CE} > 0.3\text{V}$

(硅管)。

放大区特点：三极管的 i_C 几乎不随 u_{CE} 变化而变化，仅受控于 i_B 。三极管是一个(i_B)电流控制(i_C)电流的器件。

② 饱和区：特性曲线起始上升部分。

工作条件：发射结和集电结均正偏，即 $U_{BE} \geq 0.7\text{V}$ ， $U_{CE} < 0.3\text{V}$

(硅管)。

饱和区特点： i_C 不受 i_B 控制，只随 u_{CE} 增大而增大。

③ 截止区：近似为 $i_B \leq 0$ 的曲线与横轴间的区域。

工作条件：发射结和集电结均反偏，即 $U_{BE} \leq 0.5V$ ， $U_{CE} \geq 0.3V$ （硅管）。

截止区特点： $i_B \approx 0$ ， $i_C \approx 0$ ，相当于三极管 3 个电极断开。

3 个区分别对应三极管的放大、饱和、截止 3 种工作状态。

（3）极限参数

极限参数主要包括 3 个：集电极最大容许电流 I_{CM} 、集电极最大容许耗散功率 P_{CM} 和集电极-发射极间反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。

4. 三极管的微变等效模型

三极管是一个电流控制电流的器件，其微变等效模型如图 3.1.2 所示。

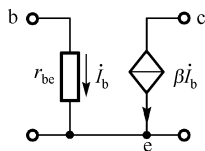


图 3.1.2 三极管的微变等效模型

图中， $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)}$ ， $r_{bb'}$ 常取为 300Ω 。

三极管的微变等效模型简言之就是：b 与 e 之间为电阻 r_{be} ，c 与 e 之间为电流源 βi_b ，b 与 c 之间为开路。该模型只能用来分析叠加在 Q 点上各交流量之间的相互关系，不能分析直流分量。

二、晶体管放大电路的 3 种接法

晶体三极管组成放大电路时，3 个极分别作为输入与输出回路的公共端，构成共发射极、共集电极和共基极放大电路。这 3 种放大电路的动态性能比较如表 3.1.1 所示。

表 3.1.1 基本放大电路 3 种组态动态性能比较

	共发射极	共集电极	共基极
放大能力	既能放大电流 又能放大电压 $A_u < 0$ ，输出电压与输入电压反相，通常其放大倍数较大	能够放大电流 不能放大电压 $A_u \approx 1$ ，输出电压与输入电压同相且等大，形成射极电压跟随器	不能放大电流 能够放大电压 $A_u > 0$ ，输出电压与输入电压同相，通常其放大倍数较大
输入电阻 (R_i)	较大	很大	较小
输出电阻 (R_o)	较大	很小	较大
用途	多级放大电路的中间级	隔离缓冲级	高频或宽频带电路

3.2 本章重点与难点

1. 三极管放大状态下的电流分配关系式。
2. 三极管放大、饱和、截止 3 种模式的工作条件和性能特点。
3. 利用估算法求解静态工作点，判断三极管的工作状态。
4. 有关非线性失真的概念及 U_{omax} 的计算。
5. 利用微变等效电路分析放大电路动态性能指标 (A_u 、 R_i 、 R_o)，熟悉 3 种放大电路的性能特点。

3.3 重点分析方法与步骤

一、三极管引脚及类型判别

三极管引脚判别和类型判别主要是考查对处于放大状态下三极管 3 个电极电流分配关系和电压大小关系的掌握程度。

1. 通过三极管的电极电流判别三极管引脚和类型

通常，此类题目给出放大状态下三极管两个电极的电流，要确定另一个电极的电流和 3 个引脚名称。

(1) 将三极管看成是广义节点, 通过 KCL 确定第 3 个电极的电流。

(2) 依据 $|i_E| > |i_C| > |i_B|$, 判别出 3 个引脚的名称: 电流最小的为基极 b, 次之为集电极 c, 最大的为发射极 e。

(3) 依据射极电流方向判别三极管的类型: i_E 为流出则为 NPN 型, 流入则为 PNP 型。

2. 通过三极管 3 个引脚对地电位判别三极管引脚和类型

通常, 此类题目是给出放大状态下三极管 3 个引脚的对地电位, 要确定三极管的类型和 3 个引脚的名称。

(1) 由前面放大的外部条件可以知道, 三极管正常放大时其基极电位始终位于中间, 所以 3 个电位按大小排序后, 位于中间的那个引脚就是基极。

(2) 由前面的特性曲线可知, 三极管放大时, $U_{BE} \approx U_{BE(on)}$ ($\pm 0.7V$ 或 $\pm 0.2 \sim 0.3V$), 所以与基极相差约 $U_{BE(on)}$ 压差的那个引脚就是发射极, 当然, 剩下那个引脚就是集电极。 $|U_{BE}|$ 若为 $0.7V$ 左右, 则为硅管, 若为 $0.2 \sim 0.3V$, 则为锗管。

(3) 若 $U_{BE} > 0$, 则为 NPN 型; 反之, 若 $U_{BE} < 0$, 则为 PNP 型。

二、三极管的工作状态判别

三极管工作状态判别主要是考察对三极管特性曲线和静态分析的掌握程度。

1. 根据三极管的 3 个引脚的对地电位判别三极管的工作状态

对于此类题目, 首先由题目已知条件判别出三极管的材料, 然后对于硅管取 $|U_{BE(on)}| = 0.7V$ (NPN 管取 $0.7V$, PNP 管取 $-0.7V$), 锗管取 $|U_{BE(on)}| = 0.2 \sim 0.3V$, 其判别流程如图 3.3.1 所示。

2. 根据放大电路的直流通路判别三极管的状态

此类题目通常会涉及静态工作点求解, 其判别步骤如下:

(1) 判断发射结是否导通, 如果截止, 则为截止区, 判断结束; 如果导通, 则求解出 I_{BQ} 的值。

(2) 假设三极管处于放大状态, 用 $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ 求出 I_{CQ} 的值, 进而求解出 U_{CEQ} 的值。

(3) 若 $U_{CEQ} > U_{CES}$ (U_{CES} 为饱和压降, 硅管约为 $0.3V$, 锗管约为 $0.1V$), 则为放大状态, 假设成立; 若 $U_{CEQ} < U_{CES}$, 则为饱和状态; 若 $U_{CEQ} = U_{CES}$, 则为临界饱和状态。

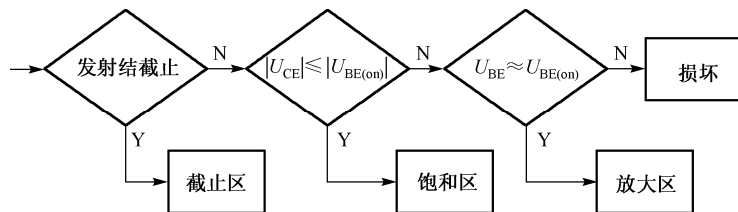


图 3.3.1 三极管类型判别流程

三、放大电路有无放大作用判别

此类题目主要是考察对放大电路组成原则的理解和掌握程度。

(1) 在直流通路中, 判别三极管是否处于放大区。

(2) 在交流通路中, 判别交流信号的传输路径是否畅通。

(3) 元件参数的选择要保证信号能不失真地放大, 即有合适的工作点, 这需要通过分析计算才能得到。

(4) 如果不具有放大作用, 将引起不放大的因素消除, 即改正电路, 使其具有放大作用。注意, 在这个改正过程中, 不能更改三极管的类型。

四、三极管放大电路分析方法

由于交流信号是叠加在静态工作点上的, 所以放大电路的分析分为静态分析和动态分析。

1. 静态分析, 确定静态工作点 Q (I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ})

静态分析即直流分析: 分析交流信号为零时, 放大电路中直流电压与直流电流的数值。可采用图解法或估算法。

(1) 静态工作点的估算法

静态工作点的估算法也称近似计算法, 分析过程如下。

① 画出放大电路直流通路, 将放大电路中的所有耦合电容和旁路电容视为开路而得到。常见的静态偏置电路如图 3.3.2 所示。

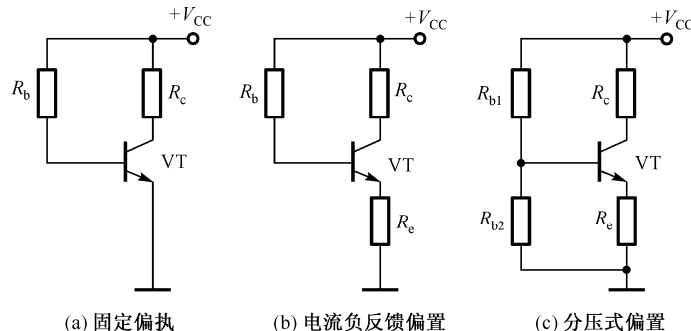


图 3.3.2 常见静态偏置电路

② 由直流通路列出输入回路和输出回路直流负载线方程, 并取硅管 $|U_{BE(on)}|$ 为 0.6V 或 0.7V, 锗管 $|U_{BE(on)}|$ 为 0.2V 或 0.3V, 带入方程, 求出静态工作点的值。对于图 3.3.2 所示的常见偏置电路, 分析如下。

a. 固定偏置电路, 如图 3.3.2(a)所示:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R_b} \quad I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} \quad U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot R_c$$

b. 电流负反馈偏置电路, 如图 3.3.2(b)所示:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R_b + (1 + \beta) \cdot R_e} \quad I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} \quad U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot (R_c + R_e)$$

在分析这个电路的 I_{BQ} 时, 应用了电阻折合的概念, 即射极电阻 R_e 如果要映射到基极, 则应乘以 $(1 + \beta)$; 反之, 如果基极电阻 R_b 要映射到射极, 则应除以 $(1 + \beta)$ 。

c. 分压式偏置电路, 如图 3.3.2(c)所示:

$$V_{BQ} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC} \quad I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - U_{BE(on)}}{R_e}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot (R_c + R_e)$$

2. 静态工作点的图解法

利用三极管的输入、输出特性曲线与管外电路所确定的负载线通过作图的方法进行求解, 分析过程如下:

(1) 画出放大电路直流通路。

(2) 列出输入回路直流负载线方程, 并在三极管的输入特性曲线上做出输入回路直流负载线, 找出对应的交点, 即 U_{BEQ} 和 I_{BQ} 。

(3) 列出输出回路直流负载线方程, 并在三极管的输出特性曲线上做出输出回路直流负载线。它与 $i_B = I_{BQ}$ 的那条特性曲线的交点就是静态工作点, 相应的坐标就是 U_{CEQ} 和 I_{CQ} 。

3. 动态分析, 求解 \dot{A}_u 、 R_i 、 R_o 、 \dot{A}_{us}

动态分析即交流分析: 电路加入交流信号后, 分析叠加在静态工作点上的电压与电流变化量之间的关系。可采用微变等效电路法和图解法。

(1) 微变等效电路法

在交流等效电路的基础上, 用图 3.1.2 所示的微变等效模型代替晶体三极管, 利用得到放大电路的微变等效电路, 分析放大电路的动态指标。分析步骤如下:

① 在放大电路静态分析的基础上, 根据静态工作点, 求出 r_{be} 。

② 画出放大电路的交流通路, 将放大电路中的大容值耦合电容和旁路电容视为短路, 直流电源对地短路。

③ 用三极管的微变等效模型替换交流通路中的三极管，从而得到整个放大电路的微变等效电路。

④ 根据微变等效电路及 \dot{A}_u 、 R_i 、 R_o 、 \dot{A}_{us} 的定义求得动态指标。

(2) 图解法

动态分析步骤如下：

① 将 u_i 叠加于 U_{BEQ} 上，画出 $u_{BE} (=U_{BEQ} + u_i)$ 的波形。

② 根据三极管的输入特性和 u_{BE} 的变化，画出 i_B 的波形。

③ 由 i_B 的波形，利用输出特性曲线和交流负载线，画出 i_C 和 u_{CE} 的波形。其中， u_{CE} 波形的交流分量就是输出电压 u_o 的波形。

通过动态过程的图解分析，从波形上测出 U_{om} 和 U_{im} 可求得 $|A_u| = \frac{U_{om}}{U_{im}}$ ，并可知 u_o 与 u_i 的相位关系，也可求得放大电路的动态范围。不失真放大的最大输出电压 U_{omax} 为：

$$U_{omax} = \min\{U_{CEQ} - U_{CES}, I_{CQ} \cdot R'_L\}$$

式中， U_{CES} 为晶体管的饱和压降，对于小功率硅管，常取 $0.3 \sim 1V$ 。

五、放大电路的非线性失真

非线性失真分为截止失真和饱和失真，对由 NPN 型管组成的共射极放大电路来说：

(1) 当 Q 点过低时将产生截止失真，输出波形将被消去上半波。为了消除截止失真，可以将 Q 点上移。在图 3.3.2(a)和(b)所示电路中可通过减小 R_b 来实现，在 3.3.2(c)电路中可通过增大 R_{b2} 或减小 R_{b1} 来实现。

(2) 当 Q 点过高时将产生饱和失真，输出波形将被削去下半波。为了消除饱和失真，可以将 Q 点下移。在图 3.3.2(a)和(b)所示电路中可通过增大 R_b 来实现，在 3.3.2(c)电路中可通过减小 R_{b2} 或增大 R_{b1} 来实现。

Q 点的改变对动态指标的影响如下：

$$Q \text{ 点上移} \rightarrow I_{BQ} \text{ 增大} \rightarrow I_{EQ} \text{ 增大} \rightarrow r_{be} \text{ 减小} \rightarrow \begin{cases} \dot{A}_u \text{ 增大} \\ R_i \text{ 减小} \\ R_o \text{ 不变} \end{cases}$$

Q 点下移，相应量会产生相反的变化。

3.4 填空题和选择题

一、填空题

3.4.1 某工作于放大状态的三极管,测得其 $I_B=20\mu\text{A}$, $I_C=1\text{mA}$, 则其直流电流放大倍数 $\bar{\beta}$ 约为_____。若 I_B 增大到 $40\mu\text{A}$ 时,对应的 I_C 增大到 2.2mA , 则其交流电流放大倍数 β 约为_____。

3.4.2 温度升高时,晶体管的参数 β 将_____ (增大、减小、不变), 反向饱和电流 I_{CBO} 将_____。

3.4.3 三极管工作在放大区时,发射结_____,集电结_____; 工作在饱和区时,发射结_____,集电结_____。

3.4.4 在分压偏置的共射放大电路中,如果增大 R_c 的阻值,集电极电流 I_{CQ} 将_____,管压降 U_{CEQ} 将_____。

3.4.5 截止失真这是由于放大电路的静态工作点接近或达到了三极管的_____而引起的非线性失真,饱和失真则是由于工作点接近或达到了三极管的_____而引起的非线性失真。这两种失真统称为_____失真。

3.4.6 共集电极放大电路又称_____输出器,它的电压放大倍数接近于_____,输出信号与输入信号_____相,输入电阻_____ (大、小),输出电阻_____ (大、小)。

3.4.7 在共射、共集和共基 3 种组态的晶体管放大电路中,输入电阻最小的是_____组态,输出电阻最小的是_____组态。输入与输出反相的是_____组态。

3.4.8 在 3 种基本组态放大电路中,当希望从信号源索取电流较小时,应选用_____组态的放大电路,当希望既能放大电压,又能放大电流时,应选用_____组态。

3.4.9 直流通路是指在_____作用下_____流经的通路,在画直流通路时电容可视为_____,交流信号可视为_____。

3.4.10 交流通路是指在_____作用下_____流经的通路,在画交流通路时_____和_____可视为短路。

二、选择正确的答案填空

3.4.11 晶体管的穿透电流 I_{CEO} 大,说明此晶体管_____。

- A. 工作电流大
- B. 击穿电压高
- C. 寿命长
- D. 热稳定性差

3.4.12 测得某处于正常放大状态的三极管的 3 个电极 1、2、3 的对地电位分别为: 0.3V 、 1.0V 、 5.4V , 则引脚 1、引脚 2、引脚 3 对应的 3 个极为_____。

- A. EBC
- B. ECB
- C. CBE
- D. BEC

3.4.13 上题中的晶体管是_____。

- A. PNP 硅管
- B. NPN 硅管
- C. PNP 锗管
- D. NPN 锗管

3.4.14 晶体管共射输出特性常用一族曲线来表示,其中每一条曲线对应某参数一个特定的值,此参数为_____。

- A. i_C
- B. u_{CE}
- C. i_B
- D. i_E

3.4.15 图 3.4.1 所示电路由于接法错误,并不能实现交流信号放大,其错误为_____。

- A. 电源极性接反
- B. 发射结被短接
- C. 交流信号不能输出
- D. 电容 C_1 、 C_2 极性接反

3.4.16 电路如图 3.4.2 所示,当晶体管的 β 由 50 变成 100 时,假设三极管仍然处于放大状态,则电路的电压放大倍数 A_u _____。

- A. 约为原来的 1/2
- B. 基本不变
- C. 约为原来的 2 倍
- D. 约为原来的 4 倍

3.4.17 电路如图 3.4.2 所示,当晶体管的 β 由 50 变成 100 时,假设三极管仍然处于放大状态,则电路的输入电阻 R_i _____。

- A. 减小很多
- B. 基本不变
- C. 约为原来的 2 倍
- D. 约为原来的 4 倍

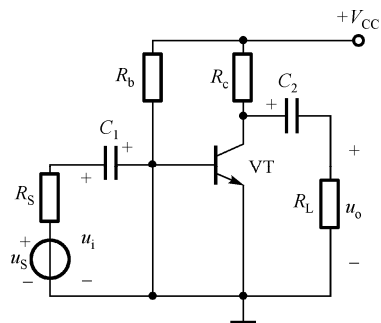


图 3.4.1 题 3.4.15 电路图

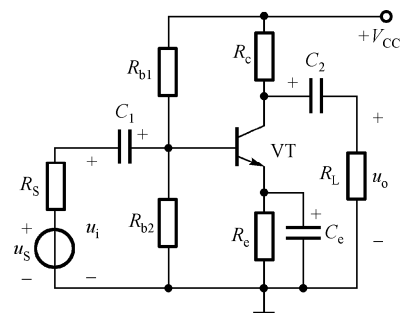
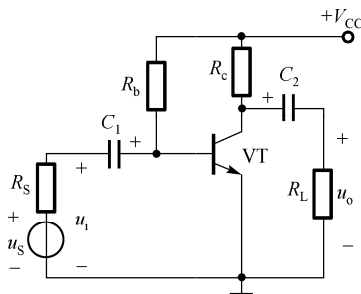


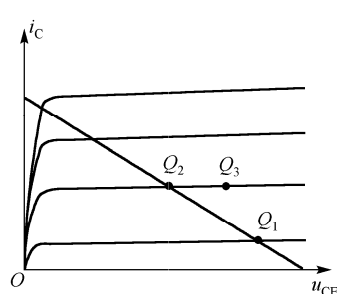
图 3.4.2 题 3.4.16 和题 3.4.17 电路图

3.4.18 放大电路如图 3.4.3(a)所示, 晶体管的输出特性如图 3.4.3(b)所示, 若要静态工作点由 Q_1 移到 Q_2 , 应使_____; 若要静态工作点由 Q_2 移到 Q_3 , 则应使_____。

- A. $R_b \uparrow$ $R_c \downarrow$ B. $R_b \uparrow$ $R_c \uparrow$
C. $R_b \downarrow$ $R_c \uparrow$ D. $R_b \downarrow$ $R_c \downarrow$



(a) 共射放大电路图



(b) 输出特性曲线

图 3.4.3 题 3.4.18 电路图

3.4.19 电路如图 3.4.3(a)所示, 其输入、输出电压如图 3.4.4 所示, 则该电路产生了_____失真, 为了减小这种失真, 可以采取的措施为_____。

- A. 截止 $R_c \uparrow$ B. 饱和 $R_c \downarrow$
C. 截止 $R_b \downarrow$ D. 饱和 $R_b \uparrow$

3.4.20 电路如图 3.4.3(a)所示, 其输入、输出电压如图 3.4.5 所示, 则该电路产生了_____失真, 为了减小这种失真, 可以采取的措施为_____。

- A. 截止 $R_c \downarrow$ B. 饱和 $R_c \uparrow$
C. 截止 $R_b \downarrow$ D. 饱和 $R_b \uparrow$

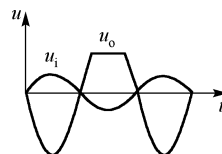


图 3.4.4 题 3.4.19 输入输出波形图

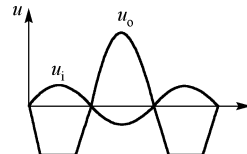


图 3.4.5 题 3.4.20 输入输出波形图

3.4.21 要求一个电路输入电阻很大, 输出电阻很小, 对放大倍数要求不高, 用三极管电路实现, 则可以选择_____。

- A. 共集放大电路 B. 共射放大电路 C. 共基放大电路

3.4.22 如果要对一宽频带信号进行放大, 用三极管电路实现, 则应采用_____放大电路。

- A. 共集电极 B. 共发射极 C. 共基极

3.5 习题 3

3.5.1 确定图 3.5.1 中晶体管其他两个电流的值。

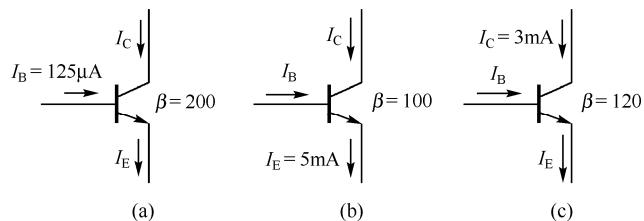


图 3.5.1 习题 3.5.1 图

解:

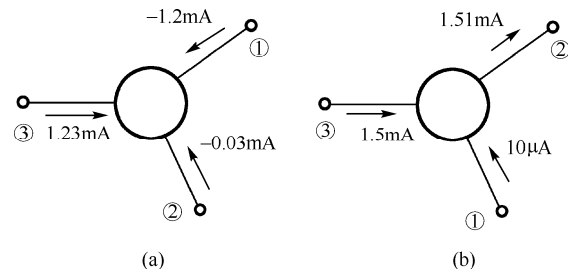


图 3.5.2 习题 3.5.2 图

解:

3.5.3 有两只工作于放大状态的晶体管，它们的两个引脚的电流大小和实际流向如图 3.5.3 所示。求另一引脚的电流大小；判断三极管是 NPN 型还是 PNP 型，3 个引脚各是什么电极；并求它们的 β 与 α 值。

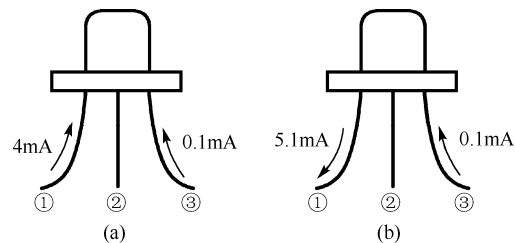


图 3.5.3 习题 3.5.3 图

解:

3.5.2 测得放大电路中的晶体三极管的 3 个电极①、②、③的电流大小和方向如图 3.5.2 所示，试判断晶体管的类型 (NPN 或 PNP)，说明①、②、③中哪个是基极 b、发射极 e、集电极 c，求出电流放大系数 β 。

3.5.4 试判断图 3.5.4 所示电路中开关 S 放在①、②、③哪个位置时 I_B 最大；放在哪个位置时 I_B 最小，为什么？

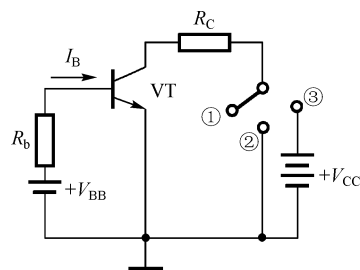


图 3.5.4 习题 3.5.4 图

解：

3.5.5 测得某放大电路中晶体三极管各极直流电位如图 3.5.5 所示，判断晶体管三极管的类型（NPN 或 PNP）及 3 个电极，并分别说明它们是硅管还是锗管。

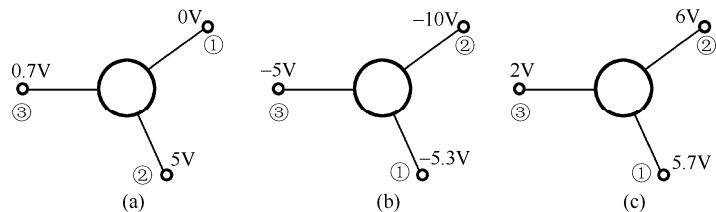


图 3.5.5 习题 3.5.5 图

解：

3.5.6 用万用表直流电压挡测得晶体三极管的各极对地电位如图 3.5.6 所示，判断这些晶体管分别处于哪种工作状态（饱和、放大、截止或已损坏）。

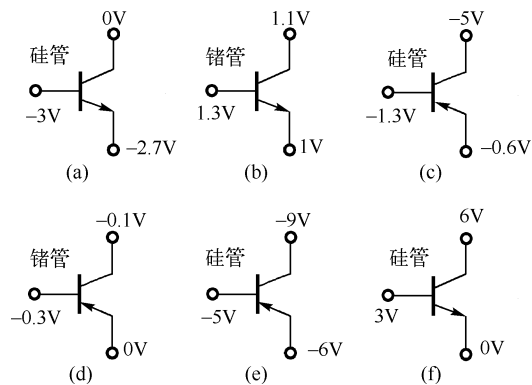


图 3.5.6 习题 3.5.6 图

解：

3.5.7 某晶体管的极限参数为 $I_{CM} = 20\text{mA}$ 、 $P_{CM} = 200\text{mW}$ 、 $U_{(BR)CEO} = 15\text{V}$ ，若它的工作电流 $I_C = 10\text{mA}$ ，那么它的工作电压 U_{CE} 不能超过多少？若它的工作电压 $U_{CE} = 12\text{V}$ ，那么它的工作电流 I_C 不能超过多少？

解：

3.5.8 图 3.5.7 所示电路对正弦信号是否有放大作用？如果没有放大作用，则说明理由，并将错误加以改正（设电容的容抗可以忽略）。

解：

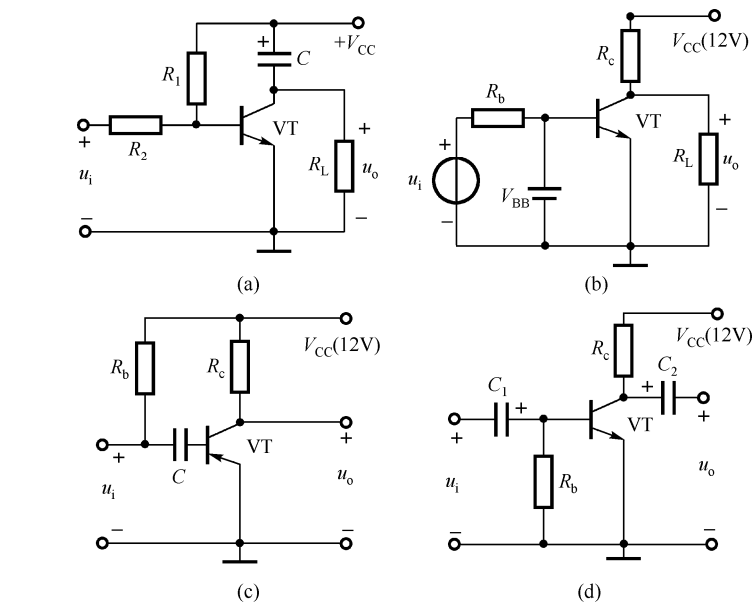


图 3.5.7 习题 3.5.8 电路图

3.5.9 确定图 3.5.8 所示电路中 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 的值。

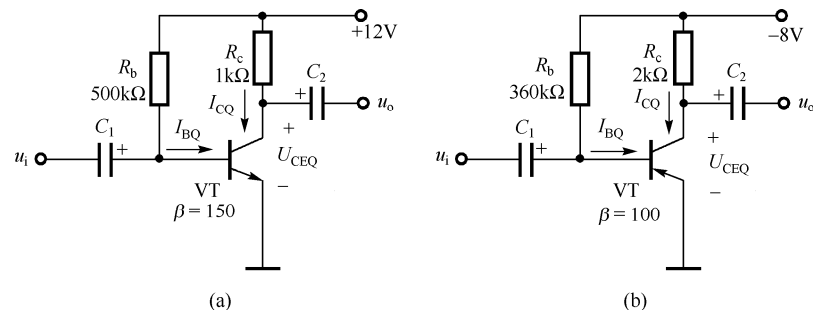


图 3.5.8 习题 3.5.9 电路图

姓名_____ 学号_____ 班级_____ 序号_____

解：

3.5.10 在图 3.5.8(a)所示电路中，假设电路其他参数不变，分别改变以下某一项参数时：（1）增大 R_b ；（2）增大 V_{CC} ；（3）增大 β 。试定性地说明放大电路的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 将增大、减小还是基本不变。

解：

3.5.11 图 3.5.9 所示为放大电路的直流通路，晶体管均为硅管，判断它的静态工作点位于哪个区（放大区、饱和区、截止区）。

解：

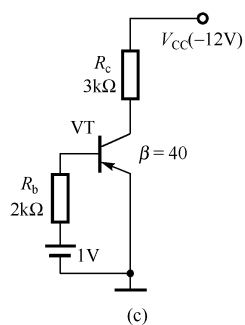
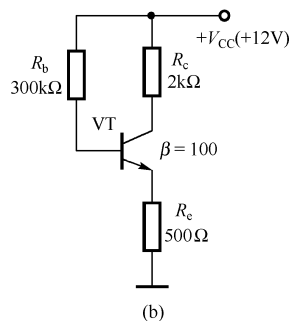
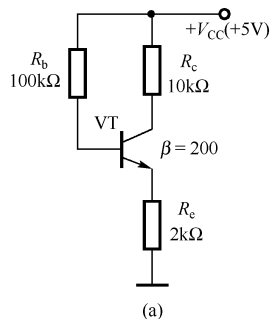


图 3.5.9 习题 3.5.11 电路图

3.5.12 画出图 3.5.10 所示电路的直流通路和微变等效电路，并标出电压、电流的参考方向。设所有电容对交流信号均可视为短路。

解：

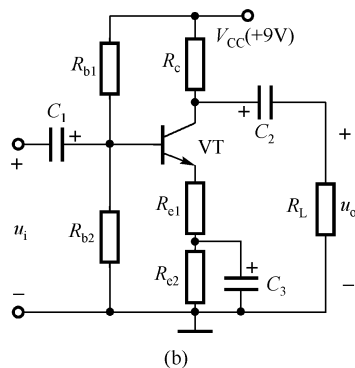
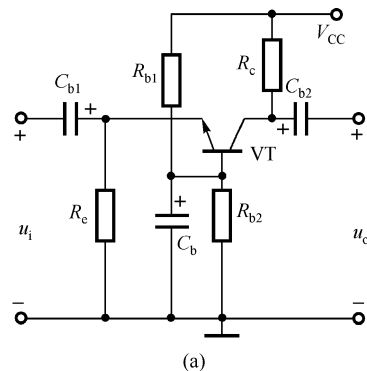


图 3.5.10 习题 3.5.12 电路图

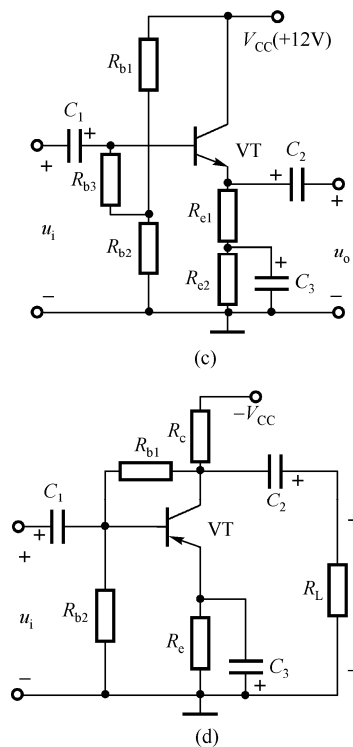


图 3.5.10 习题 3.5.12 电路图 (续)

3.5.13 放大电路如图 3.5.11(a)所示。设所有电容对交流均视为短路, $U_{BEQ} = 0.7V$, $\beta = 50$ 。(1) 估算该电路的静态工作点 Q ; (2) 画出小信号等效电路; (3) 求电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ; (4) 求电路的电压放大倍数 \dot{A}_u ; (5) 若 u_o 出现如图 3.5.11(b)所示的失真现象, 问是截止失真还是饱和失真? 为消除此失真, 应该调整电路中哪个元件, 如何调整?

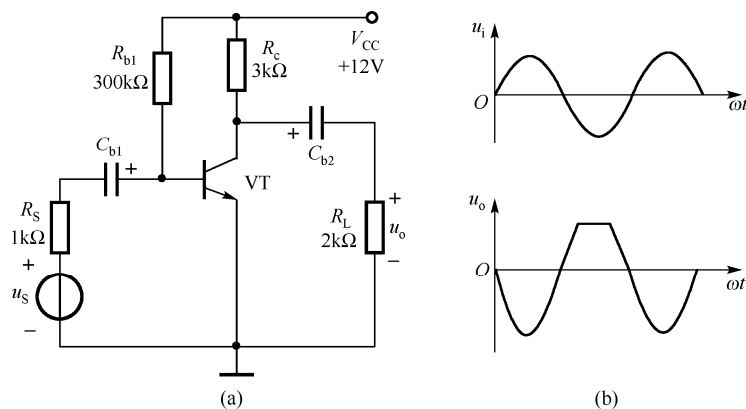
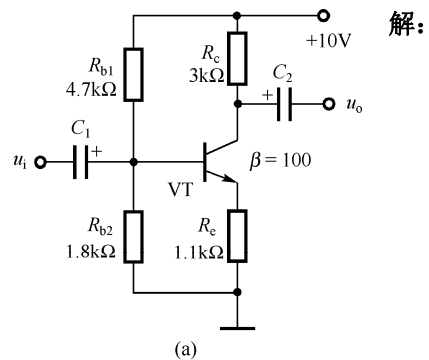


图 3.5.11 习题 3.5.13 电路图

解:

3.5.15 求解图 3.5.12 所示电路的静态工作点。



3.5.14 将图 3.5.11 中的晶体管换成一个 PNP 型晶体管， $V_{CC} = -12V$ ，请重复回答习题 3.5.13 的问题。

解：

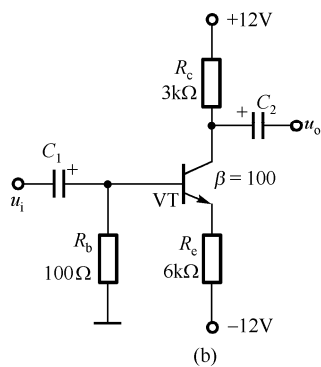


图 3.5.12 习题 3.5.15 电路图

3.5.16 图 3.5.13 所示 NPN 三极管组成的分压式工作点稳定电路中，假设电路其他参数不变，分别改变以下某一项参数时：（1）增大 R_{b1} ；（2）增大 R_{b2} ；（3）增大 R_c ；（4）增大 β 。试定性说明放大电路的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 、 r_{be} 和 \dot{A}_u 将增大、减小还是基本不变。

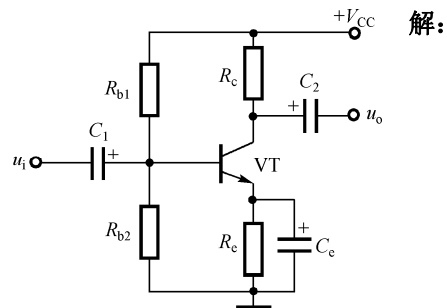


图 3.5.13 习题 3.5.16 电路图

解：

3.5.17 基本放大电路如图 3.5.14 所示。设所有电容对交流均视为短路， $U_{BEQ} = 0.7V$ ， $\beta = 100$ ， $U_{CES} = 0.5V$ 。（1）估算电路的静态工作点（ I_{CQ} ， U_{CEQ} ）；（2）求电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ；（3）求电路的电压放大倍数 \dot{A}_u 和源电压放大倍数 \dot{A}_{us} ；（4）求不失真的最大输出电压 U_{omax} 。

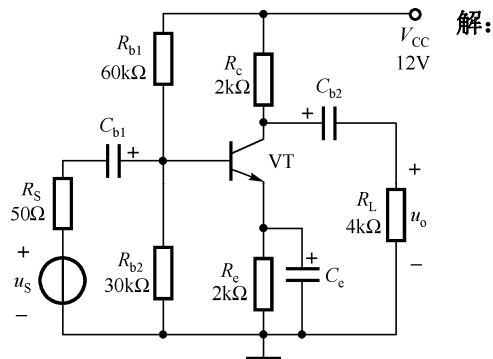


图 3.5.14 习题 3.5.17 电路图

解：

3.5.18 放大电路如图 3.5.15 所示, 设所有电容对交流均视为短路。已知 $U_{BEQ} = 0.7V$, $\beta = 100$ 。(1) 估算静态工作点 (I_{CQ} 、 U_{CEQ}); (2) 画出小信号等效电路图; (3) 求放大电路输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ; (4) 计算交流电压放大倍数 A_u 源电压放大倍数 A_{us} 。

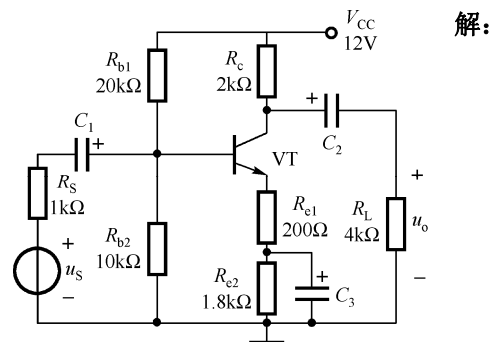


图 3.5.15 习题 3.5.18 电路图

3.5.19 放大电路如图 3.5.16 所示。已知 $V_{CC} = 20V$, $R_c = 3.9k\Omega$, $U_{BEQ} = 0.7V$, 要使 $I_{CQ} = 2mA$, $U_{CEQ} = 7.5V$, 试选择 R_c 、 R_{b1} 、 R_{b2} 的阻值。

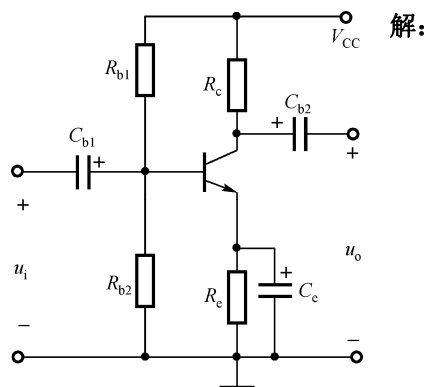


图 3.5.16 习题 3.5.19 电路图

3.5.20 电路如图 3.5.17 所示, 设所有电容对交流均视为短路。已知 $U_{BEQ} = 0.7V$, $\beta = 100$, r_{ce} 可忽略。(1) 估算静态工作点 Q (I_{CQ} 、 I_{BQ} 和 U_{CEQ}); (2) 求解 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 。

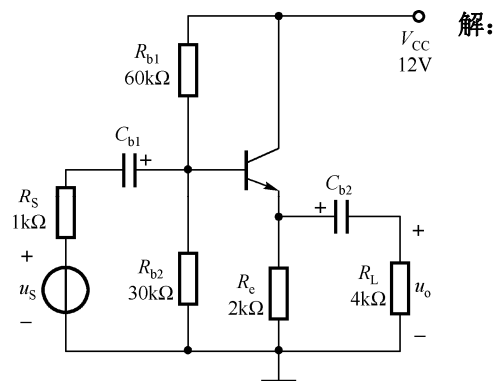


图 3.5.17 习题 3.5.20 电路图

3.5.21 一个放大电路如图 3.5.18 所示, 已知晶体管的 $U_{BEQ} = 0.7V$, $\beta = 50$, $r_{bb'} = 100\Omega$, 各电容值足够大。试求: (1) 静态工作点的值; (2) 该放大电路的电压放大倍数 \dot{A}_u 、源电压放大倍数 \dot{A}_{us} 、输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o ; (3) C_e 开路时的静态工作点及 \dot{A}_u 、 \dot{A}_{us} 、 R_i 、 R_o ; (4) 若 u_o 出现如图 3.5.18(b)所示的失真现象, 问是截止失真还是饱和失真?

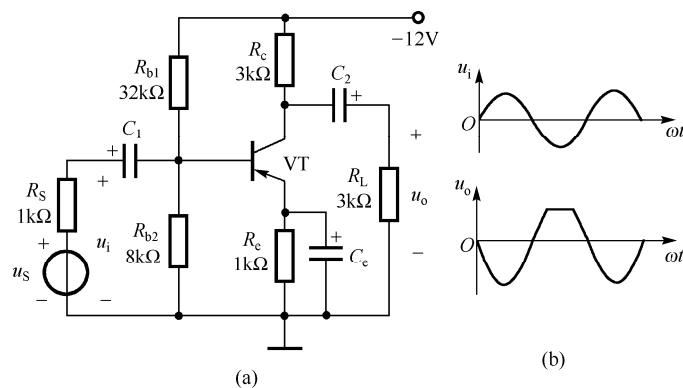


图 3.5.18 习题 3.5.21 电路图

解:

3.5.22 在图 3.5.19 所示的偏置电路中, 利用非线性电阻 R_t 的温度补偿作用来稳定静态工作点。问要求非线性元件具有正的还是负的温度系数?

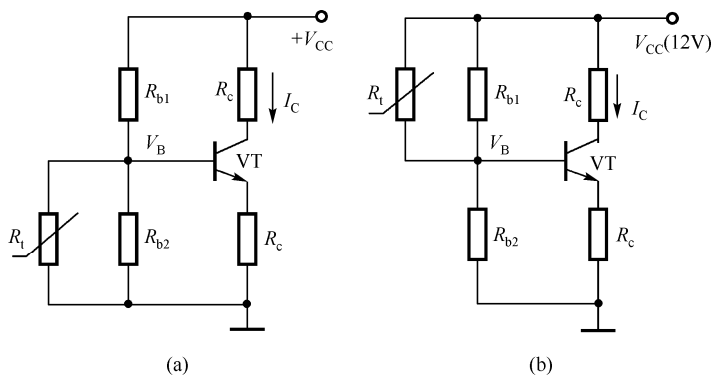


图 3.5.19 习题 3.5.22 电路图

解:

3.5.23 电路如图 3.5.20 所示, 设所有电容对交流均视为短路, $U_{BEQ} = -0.7V$, $\beta = 50$ 。试求该电路的静态工作点 Q 、 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 。

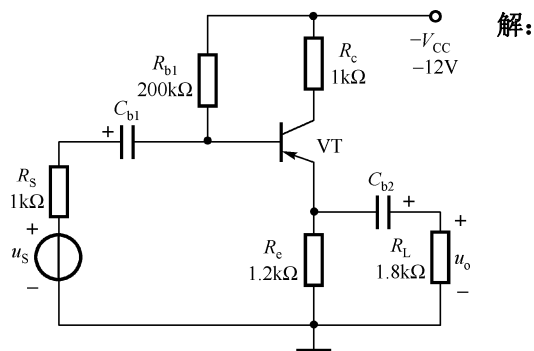


图 3.5.20 习题 3.5.23 电路图

解:

3.5.24 电路如图 3.5.21 所示, 设所有电容对交流均视为短路, 已知 $U_{BEQ} = 0.7V$, $\beta = 20$, r_{ce} 可忽略。(1) 估算静态工作点 Q ;
(2) 求解 A_u 、 R_i 和 R_o 。

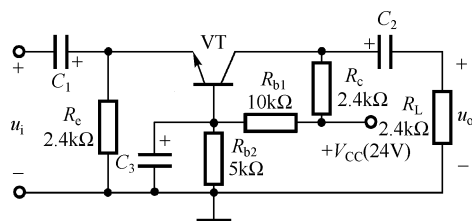


图 3.5.21 习题 3.5.24 电路图

解:

3.5.25 在图 3.5.22 所示电路中, 在 VT 的发射极接有一个恒流源, 设 $U_{BEQ} = 0.7V$ 、 $\beta = 50$, 各电容值足够大。试求:

- (1) 静态工作点 (I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 V_{CEQ});
- (2) 动态参数 A_u 、 R_i 、 R_o 。

解:

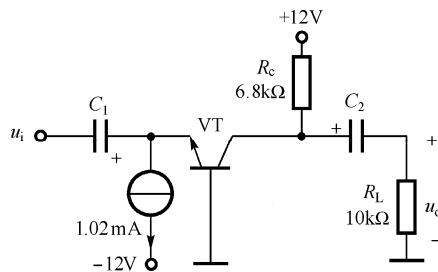


图 3.5.22 习题 3.5.25 电路图

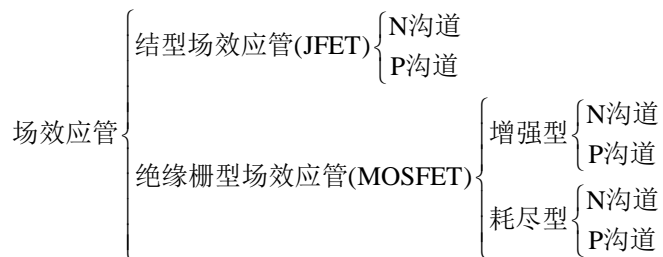
第4章 场效应管及其基本放大电路

4.1 知识要点总结

一、场效应管的基本知识

(1) 场效应管是利用电场效应来控制其电流大小的半导体器件，具体来说就是利用栅源电压 u_{GS} 来控制漏极电流 i_D 。

(2) 场效应管的分类：



(3) 符号：

图 4.1.1 所示场效应管电路符号中，箭头方向表示器件的沟道类型。

MOS 管中，源区与衬底之间形成 PN 结，图中衬底箭头方向是 PN 结正偏时的正向电流方向，若箭头所示方向为流入衬底，如图 4.1.1(a)、(c)所示为 N 沟道 MOS 管（类似 NPN 型三极管），反之则为 P 沟道 MOS 管。

JFET 中，栅区与源区之间形成 PN 结，箭头标在栅极上，若箭头所示方向为流入栅极，如图 4.1.1(e)所示，则为 N 沟道 JFET（类似 NPN 型三极管）反之则为 P 沟道 JFET。

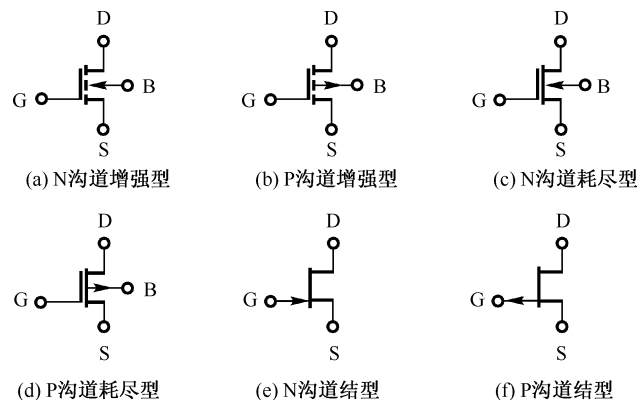


图 4.1.1 场效应管电路符号

增强型管还是耗尽型管的区别，是通过电路符号中的沟道线来表示的。若沟道线是虚线，如图 4.1.1(a)、(b)所示，则为增强型场效应管，表明 $u_{GS} = 0$ 时，导电沟道还没有形成。若沟道线是实线，如图 4.1.1(c)、(d)、(e)、(f)所示，则为耗尽型，表明 $u_{GS} = 0$ 时，导电沟道已经存在。

二、场效应管伏安特性曲线

场效应管的伏安特性包括输出特性与转移特性，特性曲线如图 4.1.2 所示。输出特性曲线与晶体三极管的类似，反映 u_{GS} 为常数时， u_{DS} 与漏极电流 i_D 的关系。因为场效应管的 $i_G \approx 0$ ，故不讨论输入特性，转移特性曲线不同于晶体三极管的输入特性曲线，它反映的是 u_{DS} 为常数时， u_{GS} 对 i_D 的控制作用。输出特性曲线可划分为 3 个区域，以 N 沟道增强型 MOS 管为例说明如下。

(1) 可变电阻区（非饱和区）：特性曲线起始上升部分。

工作条件： $u_{GS} > U_{th}$ ， $u_{DS} < u_{GS} - U_{th}$ ，沟道预夹断前的区域。

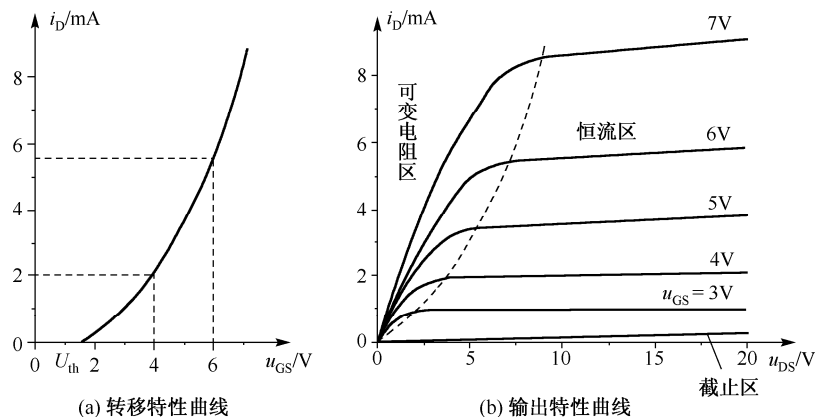


图 4.1.2 N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线

可变电阻区特点： i_D 同时受 u_{GS} 和 u_{DS} 的控制，当 u_{GS} 为常数时， u_{DS} 增大， i_D 近似线性增大，表现为电阻特性；当 u_{DS} 为常数时， u_{GS} 增加，则 i_D 增加，又表现为一种压控电阻的特性，故称为可变电阻区。

可变电阻区（非饱和区）对应晶体三极管的饱和区。

（2）饱和区（恒流区）：特性曲线近似平坦的区域。

工作条件： $u_{GS} > U_{th}$ ， $u_{DS} > u_{GS} - U_{th}$ ，沟道预夹断后的区域。

饱和区特点： i_D 只受 u_{GS} 的控制，而与 u_{DS} 近似无关，表现出类似晶体三极管的正向受控作用。

饱和区对应晶体三极管的放大区。

（3）截止区：对应 $i_D = 0$ 以下的区域。

工作条件： $u_{GS} < U_{th}$ ，沟道未形成的区域。

截止区特点： $i_G \approx 0$ ， $i_D \approx 0$ ，相当于场效应管 3 个电极断开，与晶体三极管截止区特点类似。

三、放大模式下场效应管的模型

（1）数学模型

转移特性的近似数学表达式：

$$\text{增强型 } i_D = K(u_{GS} - U_{th})^2$$

$$\text{耗尽型 } i_D \approx I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P}\right)^2$$

（2）微变等效电路模型

交流工作时，场效应管的微变等效电路模型如图 4.1.3 所示。

图中， g_m 为低频跨导。对于 JFET 和

耗尽型 MOSFET，有 $g_m = -\frac{2\sqrt{I_{DSS}I_{DQ}}}{U_P}$ ，

对于增强型 MOSFET，有 $g_m = 2K(U_{GSQ} - U_{th})$ 。

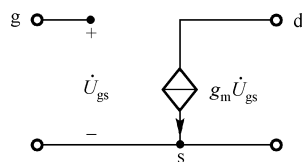


图 4.1.3 FET 微变等效电路

场效应管的微变等效电路与晶体三极管的微变等效电路非常相似，区别在于，晶体三极管的发射结正偏，输入电阻 r_{be} 较小，而场效应管 $i_G \approx 0$ ，输入电阻 $r_{gs} \rightarrow \infty$ ，所以输入端开路。场效应管的微变等效电路是一个电压控制电流源器件。

4.2 本章重点与难点

1. MOS 场效应管的工作原理、输出特性、转移特性。
2. 共源极与共漏极放大电路的工作原理。
3. 场效应管的偏置方式及解析法求解静态工作点。
4. 应用微变等效电路法对场效应管放大电路进行动态分析。

4.3 重点分析方法与步骤

一、场效应管类型判别

场效应管类型的判别主要是考察对各类型场效应管转移特性的掌握程度。

分析步骤：

(1) 根据 i_D 实际方向来判断是 N 沟道还是 P 沟道，如果 i_D 是从漏极流出，则为 P 沟道，反之则为 N 沟道。

(2) 根据 $u_{GS} = 0$ 时 i_D 是否为零来判断是耗尽型还是增强型，如果当 $u_{GS} = 0$ 时， i_D 不为零，则为耗尽型管，否则为增强型。增强型管一定是 MOSFET；如果 u_{GS} 既可以取负值、正值，也可以取零值，则为 MOSFET，如果仅能取零和负值（或正值），则为 JFET。

二、场效应管的工作状态判别

场效应管工作状态的判别主要是考察对场效应管转移特性和输出特性曲线的掌握程度。

分析步骤如下：

(1) 首先求解出 U_{GSQ} 和 I_{DQ} ，根据 U_{GSQ} 来判断是否处于截止区，对于 N 沟道，如果 $U_{GSQ} < U_{th}$ （或者 U_P ），则场效应管截止。对于 P 沟道，如果 $U_{GSQ} > U_{th}$ （或 U_P ），则场效应管截止。

(2) 如果场效应管子没有处于截止区，则根据前一步的计算结果，计算出 U_{DSQ} 的值。

对于 N 沟道：如果 $U_{DSQ} > U_{GSQ} - U_{th}$ （或 U_P ），则场效应管处于饱和区（恒流区）；反之，则处于可变电阻区。

对于 P 沟道：如果 $U_{DSQ} < U_{GSQ} - U_{th}$ （或 U_P ），则场效应管处于饱和区（恒流区）；反之，则处于可变电阻区。

(3) 对照场效应管的击穿参数，判别场效应管是否处于击穿区。

三、场效应管放大电路分析

场效应管放大电路的分析可以类比晶体三极管放大电路的分析。可以用估算法分析直流电路工作点，采用微变等效电路分析电路动态指标。

1. 静态分析，确定静态工作点 Q (U_{GSQ} 、 I_{DQ} 、 U_{DSQ})

分析步骤如下：

(1) 画出放大电路的直流通路。常见的静态偏置电路如图 4.3.1 所示。

(2) 根据偏置电路写出管外电路 U_{GS} 和 I_D 之间的关系式，根据 FET 的类型选择合适的数学模型。

对于图 4.3.1(a)所示的自偏压电路有：

$$U_{GSQ} = -I_{DQ} \cdot R_s, \quad I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_P} \right)^2$$

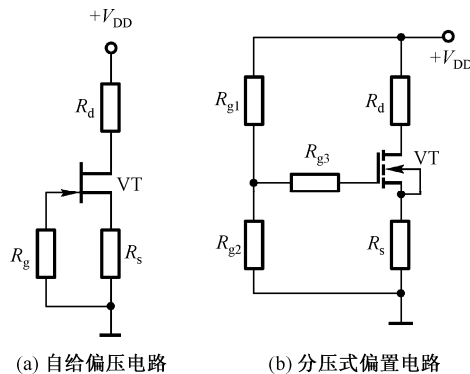


图 4.3.1 偏置电路

对于图 4.3.1(b)所示的分压式偏置电路有:

$$U_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} - I_{DQ} R_s, \quad I_{DQ} = K_n (U_{GSQ} - U_{th})^2$$

(3) 联立求解上述方程, 求解出 U_{GSQ} 和 I_{DQ} 的值。与晶体三极管的静态分析不同, 通常场效应管的静态分析会求解出两组 U_{GSQ} 和 I_{DQ} 的值。此时, 应根据场效应管的类型和参数, 舍去不合理的那一组解。具体方法可参见前述场效应管的工作状态判别部分, 将属于截止区的那一组解舍去。

根据 U_{GSQ} 和 I_{DQ} 的值, 计算出 U_{DSQ} 的值, 并判断场效应管是否处于恒流区, 如果处于恒流区, 则进行动态分析。

2. 动态分析, 求解 \dot{A}_u 、 R_i 、 R_o 、 \dot{A}_{us}

分析步骤如下:

- (1) 根据静态分析结果求出跨导参数 g_m 的值。
- (2) 根据放大电路图画出其交流通路。
- (3) 将场效应管部分用微变等效电路模型替换, 得到整个放大电路的微变等效电路图。
- (4) 根据画出的微变等效电路求解动态参数。

4.4 填空题和选择题

一、填空题

4.4.1 场效应管属于_____控制器件,它是利用输入电压产生的_____来控制输出电流。场效应管从结构上可以分成_____和_____两大类。各类又有_____沟道和_____沟道的区别。

4.4.2 场效应管的 3 个电极分别是_____、_____和_____,分别对应双极型晶体管的_____极、_____极和_____极。

4.4.3 场效应管的输入电阻为_____,其漏极电流 i_D 主要受到_____控制。

4.4.4 场效应管跨导 g_m 表示_____对漏极电流 i_D 的控制能力的强弱。

二、选择正确的答案填空

4.4.5 场效应管的跨导 g_m 的含义为_____。

A. $g_m = \frac{\partial u_{GS}}{\partial u_{DS}}$ B. $g_m = \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D}$

C. $g_m = \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}}$ D. $g_m = \frac{\partial i_D}{\partial i_G}$

4.4.6 场效应管的转移特性如图 4.4.1 所示,则该管子类型为_____。

- A. 结型 N 沟道场效应管
- B. 增强型 N 沟道场效应管
- C. 耗尽型 N 沟道场效应管
- D. 增强型 P 沟道场效应管

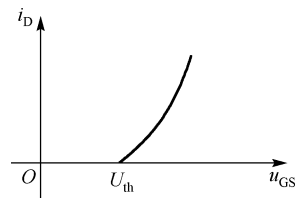


图 4.4.1 题 4.4.6 转移特性

4.4.7 场效应管的转移特性是在 U_{DS} 为固定值时_____的关系曲线。

- A. u_{GS} 与 i_G B. u_{DS} 与 i_G C. u_{GS} 与 i_D D. u_{DS} 与 i_D

4.4.8 N 沟道增强型绝缘栅场效应管,工作在恒流区时其栅源电压 U_{GS} 为_____。

- A. 正极性 B. 负极性
C. 等于零 D. 不能确定极性

4.4.9 耗尽型场效应管的跨导 g_m 和静态电流 I_{DQ} 的关系为_____。

- A. 与 I_{DQ} 成正比 B. 与 $\sqrt{I_{DQ}}$ 成正比
C. 与 I_{DQ}^2 成正比 D. 与 I_{DQ} 成反比

4.4.10 在图 4.4.2 所示的几个偏置电路中,能够正常工作于恒流区的是_____。

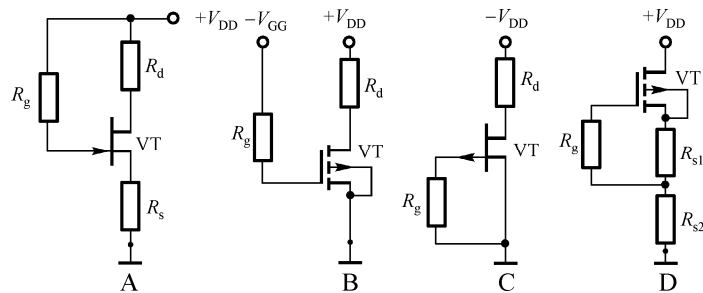


图 4.4.2 题 4.4.10 图

4.5 习题 4

4.5.1 图 4.5.1 所示为场效应管的转移特性，请分别说明场效应管各属于何种类型。说明它的开启电压 U_{th} （或夹断电压 U_p ）约为多少。

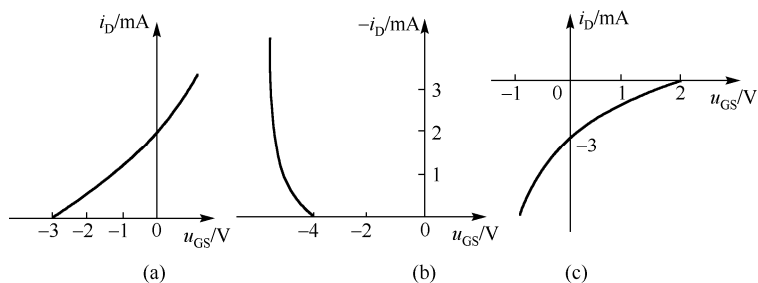


图 4.5.1 习题 4.5.1 图

解：

4.5.2 图 4.5.2 所示为场效应管的输出特性曲线，分别判断各场效应管属于何种类型（增强型、耗尽型、N 沟道或 P 沟道），说明它的夹断电压 U_p （或开启电压 U_{th} ）是多少。

解：

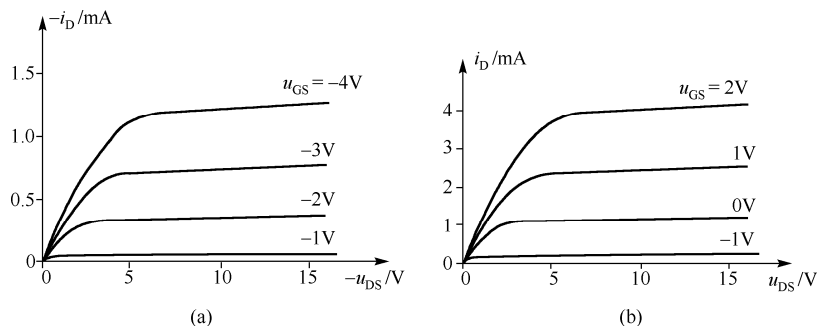


图 4.5.2 习题 4.5.2 图

4.5.3 某 MOSFET 的 $I_{DSS} = 10\text{mA}$ 且 $U_p = -8\text{V}$ 。（1）此元件是 P 沟道还是 N 沟道？（2）计算 $U_{GS} = -3\text{V}$ 时的 I_D ；（3）计算 $U_{GS} = 3\text{V}$ 时的 I_D 。

解：

4.5.4 画出下列 FET 的转移特性曲线。

- (1) $U_P = -6V$, $I_{DSS} = 1mA$ 的 MOSFET;
 (2) $U_{th} = 8V$, $K_n = 0.2mA/V^2$ 的 MOSFET。

解:

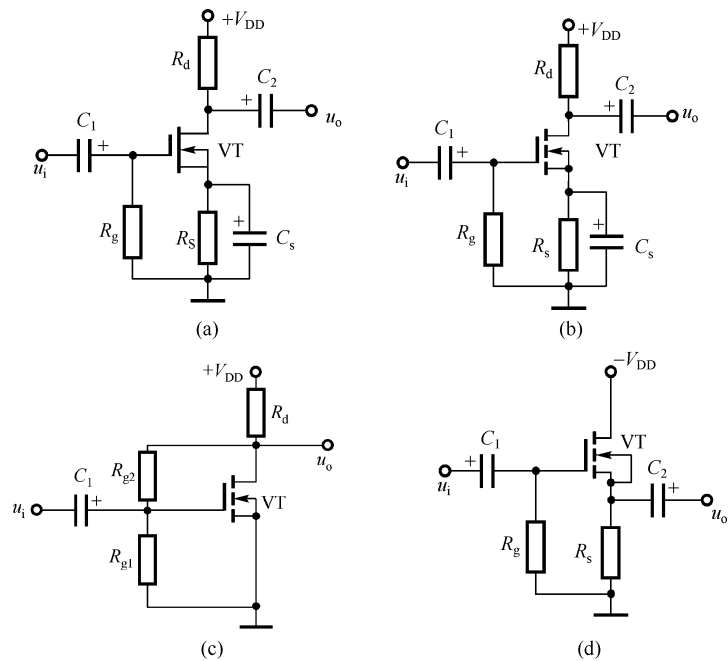


图 4.5.3 习题 4.5.6 电路图

解:

4.5.5 试在具有四象限的直角坐标上分别画出 4 种类型 MOSFET 的转移特性示意图, 并标明各自的开启电压或夹断电压。

解:

4.5.6 判断图 4.5.3 所示各电路是否有可能正常放大正弦信号。
 电容对交流信号可视为短路。

4.5.7 电路如图 4.5.4 所示, MOSFET 的 $U_{th} = 2V$, $K_n = 50mA/V^2$, 确定电路 Q 点的 I_{DQ} 和 U_{DSQ} 值。

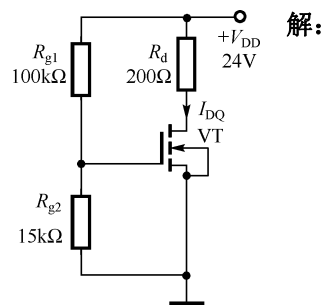


图 4.5.4 习题 4.5.7 电路图

4.5.8 试求图 4.5.5 所示每个电路的 U_{DS} , 已知 $|I_{DSS}| = 8mA$ 。

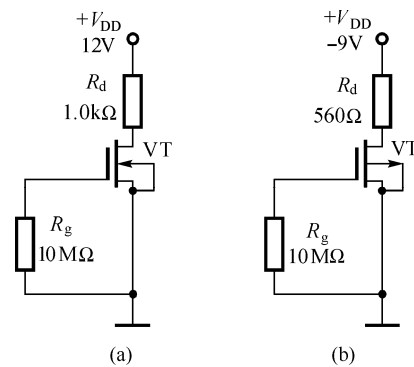


图 4.5.5 习题 4.5.8 电路图

解:

4.5.9 电路如图 4.5.10 所示, 已知 VT 在 $U_{GS} = 5V$ 时的 $I_D = 2.25mA$, 在 $U_{GS} = 3V$ 时的 $I_D = 0.25mA$ 。现要求该电路中 FET 的 $V_{DQ} = 2.4V$ 、 $I_{DQ} = 0.64mA$, 试求:

- (1) 场效应管的 K_n 和 U_{th} 的值;
- (2) R_d 和 R_s 的值应各取多大?

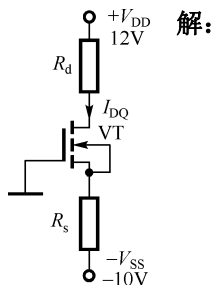


图 4.5.6 习题 4.5.9 图

4.5.10 电路如图 4.5.7 所示, 已知 FET 的 $U_{th} = 3V$ 、 $K_n = 0.1mA/V^2$ 。现要求该电路中 FET 的 $I_{DQ} = 1.6mA$, 试求 R_d 的值?

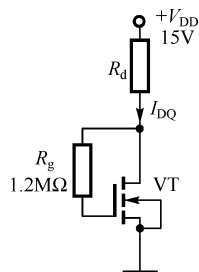


图 4.5.7 习题 4.5.10 图

解:

4.5.11 电路如图 4.5.8 所示, 已知场效应管 VT 的 $U_{th} = 2V$, $U_{(BR)DS} = 16V$ 、 $U_{(BR)GS} = 30V$, 当 $U_{GS} = 4V$ 、 $U_{DS} = 5V$ 时 $I_D = 9mA$ 。请分析这 4 个电路中的场效应管各工作在什么状态 (截止、恒流、可变电阻、击穿)?

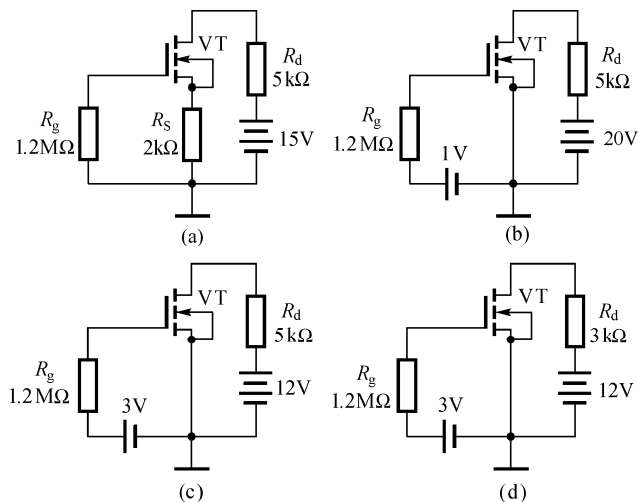


图 4.5.8 习题 4.5.11 图

解:

4.5.12 电路如图 4.5.9 所示, 已知场效应管 VT_1 的 $K_n = 0.16\text{mA/V}^2$, $U_{th} = 3.5\text{V}$; VT_2 的 $I_{DSS} = -2\text{mA}$, $U_p = 2\text{V}$ 。试分析这两个电路中的场效应管各工作在截止区、恒流区、可变电阻区中的哪个区。

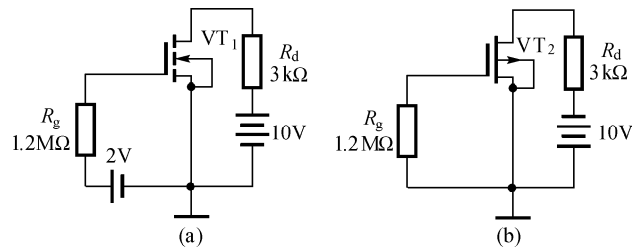


图 4.5.9 习题 4.5.12 图

解:

4.5.13 图 4.5.10 所示场效应管工作于放大状态, r_{ds} 忽略不计, 电容对交流视为短路, 跨导为 $g_m = 1\text{ms}$ 。(1) 画出电路的交流小信号等效电路; (2) 求电压放大倍数 \dot{A}_u 和源电压放大倍数 \dot{A}_{us} ; (3) 求输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

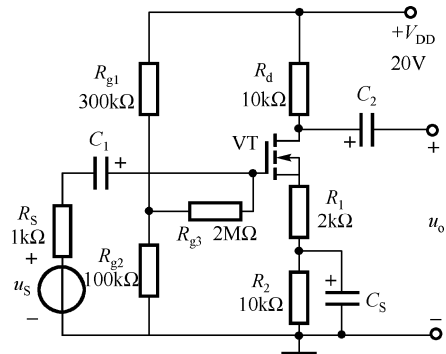
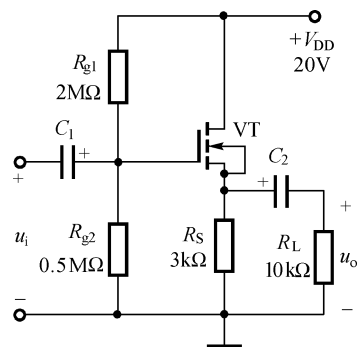


图 4.5.10 习题 4.5.13 电路图

解:

4.5.14 电路如图 4.5.11 所示, 已知 FET 在 Q 点处的跨导 $g_m = 2\text{ms}$, $\lambda = 0$, 试求该电路的 \dot{A}_u 、 R_i 、 R_o 值。



解:

图 4.5.11 习题 4.5.14 电路图

4.5.15 电路如图 4.5.12 所示，场效应管的 $g_m = 11.3\text{ms}$ ， r_{ds} 忽略不计。试求共漏放大电路的源电压增益 A_{us} 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

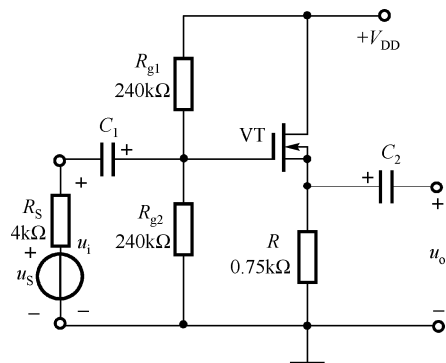


图 4.5.12 习题 4.5.15 电路图

解：

4.5.16 放大电路如图 4.5.13 所示, 已知场效应管的 $I_{DSS} = 1.6\text{mA}$, $U_P = -4\text{V}$, r_{ds} 忽略不计, 若要求场效应管静态时的 $U_{GSQ} = -1\text{V}$, 各电容均足够大。试求: (1) R_{g1} 的阻值; (2) \dot{A}_u 、 R_i 及 R_o 的值。

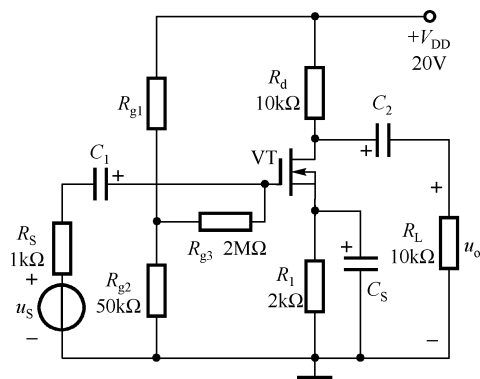


图 4.5.13 习题 4.5.16 电路图

解:

4.5.17 图 4.5.14(a)所示电路中的场效应管的转移特性如图 4.5.14(b)所示, 试求解该电路的 U_{GS} 、 I_D 和 U_{DS} 。

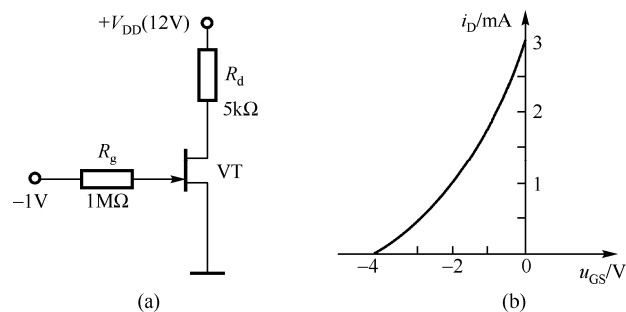


图 4.5.14 习题 4.5.17 图

解:

4.5.18 电路如图 4.5.15 所示, 已知 FET 的 $I_{DSS} = 3\text{mA}$, $U_p = -3\text{V}$, $U_{(BR)DS} = 10\text{V}$ 。试问: 在下列 3 种条件下, FET 各处于哪种状态?

- (1) $R_d = 3.9\text{k}\Omega$; (2) $R_d = 10\text{k}\Omega$; (3) $R_d = 1\text{k}\Omega$ 。

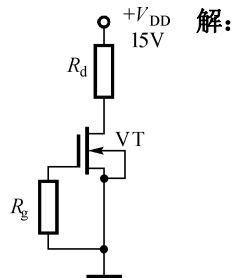


图 4.5.15 习题 4.5.18 图

4.5.19 电路如图 4.5.16 所示, (1) JFET 的 $U_p = -8\text{V}$, $I_{DSS} = 16\text{mA}$, 确定电路 Q 点的 I_{DQ} 和 U_{DSQ} 值; (2) 将 VT 换成 $U_p = -10\text{V}$, $I_{DSS} = 12\text{mA}$ 的 JFET, 重新确定电路 Q 点的 I_{DQ} 和 U_{DSQ} 值。

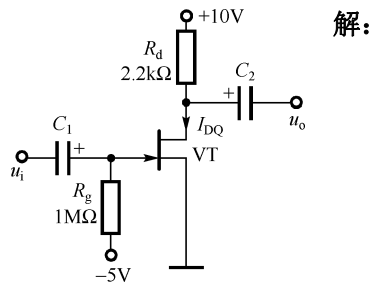


图 4.5.16 习题 4.5.19 图

4.5.20 源极输出器电路如图 4.5.17 所示, 已知场效应管在工作点上的互导 $g_m = 0.9\text{ms}$, r_{ds} 忽略不计, 其他参数如图 4.5.17 所示。求电压增益 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

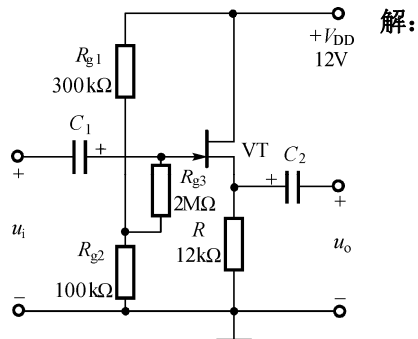


图 4.5.17 习题 4.5.20 电路图

第 5 章 多级放大电路与集成运算放大器单元电路

5.1 知识要点总结

一、多级放大电路

(1) 将基本放大电路级联或适当组合可以构成各具特点的多级放大电路。多级放大电路的电压放大倍数为各级电路的放大倍数的乘积，但在计算每级电压放大倍数时应将后级的输入电阻作为其负载。多级放大电路的输入电阻就是第一级的输入电阻，而输出电阻就是最后一级的输出电阻。

(2) 多级放大电路的耦合方式主要有：直接耦合、阻容耦合、变压器耦合及光电隔离耦合。几种耦合方式各有特点，直接耦合的特点是：不仅能放大交流信号，还能放大直流信号或缓变信号，被广泛用于集成放大电路中，但存在着严重的零点漂移现象。

二、电流源电路

常用的由晶体三极管构成的 3 种基本电流源电路为：镜像电流源电路、比例式电流源电路和微电流源电路，其电路图如图 5.1.1 所示。

(1) 镜像电流源电路： $I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R}$ ， $I_o \approx I_R$ 。 I_o 与 I_R 成 1 倍关系。

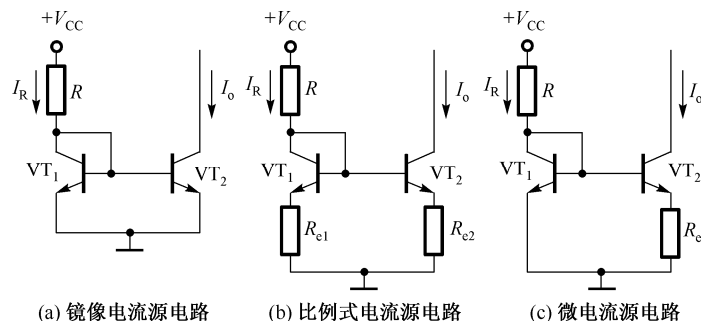


图 5.1.1 基本电流源电路

(2) 比例式电流源电路： $I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R + R_{e1}}$ ， $I_o \approx \frac{R_{e1}}{R_{e2}} I_R$ 。 I_o 与 I_R 成任意比例关系。

(3) 微电流源电路： $I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R}$ ， $I_o \approx \frac{U_T}{R_e} \ln \frac{I_R}{I_o}$ 。 I_o 为微安级电流。

将图 5.1.1 中的晶体三极管用 MOS 场效应管代替，可以得到由 MOSFET 构成的电流源电路。

电流源电路的作用主要有两个：一是做恒流偏置；二是做放大电路的有源负载。

三、差分式放大电路

差分电路由两个性能完全相同的共发射极电路经射极电阻 R_{EE} 耦合而成。该电路具有抑制零点漂移的作用，广泛用于直接耦合放大电路和集成电路的输入级。

(1) 差模信号与共模信号

大小相等、相位相反的信号称为差模信号；大小相等、相位相同的信号，则称为共模信号。

定义：差模输入信号 u_{id} 是两个输入信号之差，而共模信号 u_{ic} 是两者的算术平均值

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$$
$$u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2})$$

当用差模和共模信号表示两个输入电压时，对上述两式进行线性变换，有

$$u_{i1} = u_{ic} + \frac{u_{id}}{2}$$
$$u_{i2} = u_{ic} - \frac{u_{id}}{2}$$

差模输入信号 u_{id} 加在两管输入端之间，对单管而言，每管的差模输入电压为 $u_{i1} = -u_{i2} = u_{id} / 2$ ；共模输入电压 u_{ic} 加在每个管子的输入端与“地”之间，每个管子的输入电压为 $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$ 。

在差模信号和共模信号的共同作用下，对于线性放大电路来说，可以利用叠加原理来求得总的输出电压，即

$$u_o = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic}$$

(2) 差分放大电路的性能指标

差分放大电路按输入、输出方式的不同可分为 4 种典型电路：双端输入双端输出、双端输入单端输出、单端输入双端输出和单端输入单端输出。4 种放大电路的主要性能指标与输入方式无关，只与输出方式有关。表 5.1.1 列出了射极耦合差分放大电路几种输入、输出方式下的性能指标比较。

四、功率放大电路

功率放大电路的作用是将信号的功率放大，它输入的是较大的电压信号，输出信号则既要有较大的电压，又要有足够的电流，即有大的功率。因为输入为大信号，故对其分析不能用微变等效电路法，而只能用图解法或最大值的近似估算法。其研究重点是电路的组成、工作原理、消除失真的方法、最大输出功率和效率的计算。

3 类功放电路的对比如表 5.1.2 所示。

(1) 工作状态、效率及失真情况

根据导通角的不同，功率放大器可分为甲类、乙类、甲乙类等工作状态。

(2) 双电源互补对称功放电路

① 电路形式（如图 5.1.2 所示）。

② 性能参数计算：

甲乙类功放电路的性能和对管子的参数要求与乙类功放电路非常接近，故可统一视为乙类功放电路来分析。

$$\text{最大输出功率 } P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$$

$$\text{直流供给最大功率 } P_{Vm} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L}$$

$$\text{转换效率 } \eta = \frac{P_o}{P_V} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{om}}{V_{CC}}$$

若 $U_{om} \approx V_{CC}$ ，则 $\eta_{max} = \pi/4 = 78.5\%$ 。

③ 功放管的选择：

最大管耗为 $P_{CM} \geq 0.2P_{om}$ ，击穿电压为 $|U_{(BR)CEO}| \geq 2V_{CC}$ ，最大集电极电流为 $I_{CM} \geq V_{CC}/R_L$ 。

表 5.1.1 射极耦合差分放大电路不同接法下性能比较

双端输出差分电路		单端输出差分电路	
差模	共模	差模	共模
$R_{od} = 2R_c$	无意义	$R_{od} = R_c$	$R_{oc} = R_c$
$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = A_{u1}$ $= \frac{-\beta \left(R_c // \frac{R_L}{2} \right)}{r_{be}}$	$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} = 0$	$A_{ud1} = \frac{u_{od1}}{u_{id}}$ $= \frac{A_{u1}}{2} = -A_{ud2}$ $= \frac{-\beta(R_c // R_L)}{2r_{be}}$	$A_{uc1} = \frac{u_{oc1}}{u_{ic}} = A_{u1}$ $\approx -\frac{R'_L}{2R_{EE}}$
$K_{CMR} = \left \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right \rightarrow \infty$		$K_{CMR} = \left \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right = \frac{\beta R_{EE}}{r_{be}}$	
差模输入电阻	$R_{id} = 2R_{i1} = 2r_{be}$		
共模输入电阻	$R_{ic} = \frac{R_{i1}}{2} = \frac{1}{2}[r_{be} + (1 + \beta)2R_{EE}]$		

表 5.1.2 3 类功放电路的对比

	甲类	乙类	甲乙类
工作点	Q 点在特性曲线的线性部分 I_{CQ} 较大	Q 点位于特性曲线的截止点 $I_{CQ}=0$	Q 点位于靠近截止区的微导通点 $I_{CQ}\approx 0$
导通角	360°	180°	略大于 180°
效率	非常低	很高 (最高达 78.5%)	很高, 接近于乙类
非线性失真	无	构成的互补对称电路存在交越失真	构成的互补对称电路消除了交越失真

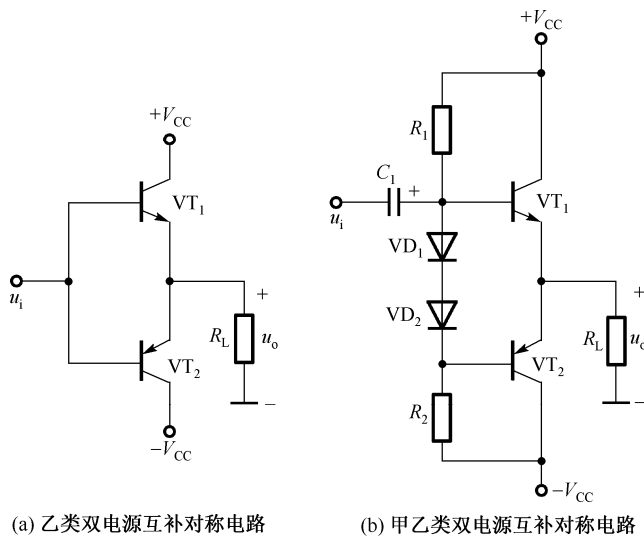


图 5.1.2 双电源互补对称电路

(3) 单电源互补对称功放电路

将双电源电路中的 $-V_{CC}$ 接地, 且将一个电容 C 与 R_L 串联, 则电路就由双电源互补对称电路转变为了单电源互补对称电路。对单电源

电路的分析, 可以仿照双电源电路进行, 只需将双电源分析式中的 V_{CC} 用 $V_{CC}/2$ 替代即可。

(4) 复合管

①两只晶体管正确连接成复合管, 必须保证每只晶体管各电极电流都能顺着各自正常工作方向流动。

②复合后的管子的类型与前级 VT_1 相同。

③复合后的电流放大系数近似等于两管的 β 相乘。

5.2 本章重点与难点

1. 多级放大电路的组成、耦合方式及多级放大电路的计算。
2. 直接耦合放大电路的零点漂移概念。
3. 电流源电路及计算。
4. 典型差分放大电路的工作原理及计算。
5. 功率放大电路的特点、分类及计算。
6. 复合管结构的特点及计算。
7. 集成运算放大器的特点、电路组成及主要参数。

5.3 重点分析方法与步骤

一、多级放大电路性能分析

分析多级放大电路时, 可将其拆分成单级电路进行分析, 但必须注意前后级电路之间的互相影响。

方法一: 只考虑后级对前级的影响, 将后级的输入电阻做为前级的负载电阻。

方法二：把前级输出看作后级的信号源，该信号源的电压为前级的开路输出电压，信号源内阻为前级的输出电阻。

这两种方法在分析同一问题时，只能采用其中的一种方法，不能混用。显然，多级放大电路级间的影响是靠输入和输出电阻来反映的。

二、差分放大电路的半电路分析法

差分放大电路由于电路两边完全对称，因此分析的关键，就是如何分别画出差模输入与共模输入时的半电路的交流通路，在此基础上，再根据差模与共模各项性能指标的定义，找出与半电路性能之间的关系，从而得出分析结果。具体分析步骤如下。

第一步，估算静态工作点（如表 5.1.1 中图）。

分析步骤为：求出 $I_{EE} \rightarrow I_{EQ1} = I_{EQ2} = \frac{I_{EE}}{2} \rightarrow I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx \frac{I_{EE}}{2} \rightarrow U_{CEQ1} = U_{CEQ2} = V_{CQ} - V_{EQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - V_{EQ}$ ，而 $U_{BE(on)} = V_{BQ} - V_{EQ}$

第二步，差模分析。

分析步骤为：画半电路差模交流通路 \rightarrow 计算 A_{ud} 、 R_{id} 、 R_{od}

（1）画半电路差模交流通路的关键就在于对公共器件（ R_{EE} 和 R_L ）的处理。

电阻 R_{EE} ：无论输入采用什么方式， R_{EE} 均可视为短路。

负载电阻 R_L ：双端输出，每管负载为 $R_L/2$ ，单端输出，每管负载为 R_L 。

此时，差分电路被分解为两个简单的共发射极电路。

（2）差模性能指标的计算

A_{ud} 仅与输出方式有关：双端输出时等于单级共发射级放大电路的电压增益，单端输出时等于单级共发射级放大电路的电压增益的一半。

$A_{ud1} = -A_{ud2}$ ， VT_1 的集电极为反相输出端， VT_2 的集电极为同相输出端。

R_{id} 与电路的输入输出方式无关：它为两级共发射极电路输入电阻的串联值，等于单级共发射极放大电路输入电阻的 2 倍。

R_{od} 仅与输出方式有关：双端输出时等于单级共发射极放大电路输出电阻的 2 倍，单端输出时等于单级共发射极放大电路的输出电阻。

第三步，共模分析。

分析步骤为：画半电路共模交流通路 \rightarrow 计算 A_{uc} 、 R_{ic} 、 K_{CMR}

（1）画半电路共模交流通路

电阻 R_{EE} ：与输入输出方式无关，每管射极电阻均为 $2R_{EE}$ 。

负载电阻 R_L ：双端输出时，负载 R_L 相当于开路，单端输出时，每管负载均为 R_L 。

此时，差分电路被分解为两个射极电阻为 $2R_{EE}$ 的共发射极电路。

（2）共模性能指标的计算

A_{uc} 仅与输出方式有关：双端输出时等于 0，单端输出时， $A_{uc1} = A_{uc2}$ ，等于射极接 $2R_{EE}$ 的单级共发射极放大电路的电压增益。

R_{ic} 与电路输入输出方式无关：它为两级共发射极电路输入电阻的并联值，等于射极接 $2R_{EE}$ 的单级共发射极放大电路输入电阻的一半。

R_{oc} 仅与输出方式有关：双端输出时无意义，单端输出时等于射极接 $2R_{EE}$ 单级共发射极放大电路的输出电阻。

第四步，根据需计算输出电压。

双端输出 $u_o = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic} = A_{ud}u_{id}$ ，

单端输出 $u_{o1} = A_{ud1}u_{id} + A_{uc1}u_{ic}$ ， $u_{o2} = A_{ud2}u_{id} + A_{uc2}u_{ic}$ ，

其中 $u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$ ， $u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$ 。

5.4 填空题和选择题

一、填空题

5.4.1 在多级放大电路中,后级的输入电阻是前级的_____,而前级的输出电阻则也可视为后级的_____;前级对后级而言又是_____。

5.4.2 多级放大器中,设各级的增益为 A_{u1} , A_{u2} , \dots , A_{un} ; 输入电阻为 R_{i1} , R_{i2} , \dots , R_{in} ; 输出电阻为 R_{o1} , R_{o2} , \dots , R_{on} 。则多级放大器的增益为 A_u =_____; 多级放大器的输入电阻为 R_i =_____; 多级放大器的输出电阻为 R_o =_____。

5.4.3 在相同的条件下,阻容耦合放大电路的零点漂移比直接耦合放大电路_____,这是由于_____。

5.4.4 为了放大变化缓慢的微弱信号,应该选用_____耦合放大电路;为了实现阻抗变换,放大电路应该采用_____耦合方式。

5.4.5 利用电流源电路输出电流稳定的特性,在模拟集成电路中常用来为放大电路提供稳定的_____;由于电流源具有直流电阻_____而交流电阻很_____的特点,在模拟集成电路中广泛用作_____使用。

5.4.6 共模抑制比 K_{CMR} 是_____之比, K_{CMR} 越大,表明电路_____。

5.4.7 通用型集成运算放大器的输入级大多采用_____电路,输出级大多采用_____电路。

5.4.8 集成运算放大器的两个输入端分别为_____端和_____端,前者的极性与输出端_____,后者的极性与输出端_____。

5.4.9 功率放大电路工作在乙类工作状态下时,由于三极管

死区电压的存在,其输出将产生_____失真,可使其工作在_____工作状态来消除这种失真。

5.4.10 工作在乙类工作状态的功率放大电路,其能达到的最高效率 η 为_____。

二、选择正确的答案填空

5.4.11 直接耦合放大电路存在零点漂移的主要原因是_____。

- A. 电源电压不稳定
- B. 电阻阻值有误差
- C. 晶体管参数受温度影响
- D. 晶体管参数的分散性

5.4.12 关于集成运算放大器,下列说法正确的是_____。

- A. 高增益的直接耦合电压放大器
- B. 只能放大直流信号
- C. 高增益的阻容耦合电压放大器
- D. 输出电阻很大

5.4.13 选用差分放大电路做为多级放大电路的第一级的原因是_____。

- A. 提高放大倍数
- B. 克服温漂
- C. 稳定放大倍数
- D. 提高输入电阻

5.4.14 集成放大电路采用直接耦合方式的原因是_____。

- A. 便于集成
- B. 便于放大交流信号
- C. 电路具有最佳性能
- D. 易于制作大容量电阻

5.4.15 多级放大电路中输出级采用共集电极放大电路是为了_____。

- A. 改善电路的静态工作点
- B. 电压放大倍数的数值大
- C. 带负载能力强
- D. 最大不失真输出电压大

5.4.16 已知输入信号 $u_{i1} = 30\text{mV}$, $u_{i2} = 10\text{mV}$, 则共模信号 u_{ic} 和差模信号 u_{id} 分别为_____。

- A. 20mV 10mV B. 40mV 20mV
C. 20mV 20mV D. 40mV 10mV

5.4.17 在图 5.4.1 所示的差分放大电路中, 如果 u_{i1} 与 u_{i2} 都是正值, 当 $u_{i1} > u_{i2}$ 时, u_o _____。

- A. >0 B. <0 C. $=0$ D. 不能确定

5.4.18 在图 5.4.1 所示的差分放大电路中, 电阻 R_{EE} 对_____起抑制作用。

- A. 差模信号 B. 共模信号 C. 差模信号和共模信号

5.4.19 用恒流源取代图 5.4.1 所示电路中的电阻 R_{EE} , 在单端输出时, 能够使_____。

- A. 差模放大倍数数值增大
B. 差模输入电阻增大
C. 抑制共模信号能力增强
D. 共模放大倍数数值增大

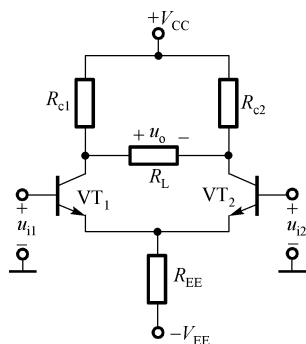


图 5.4.1 题 5.4.17 和题 5.4.18 图

5.4.20 图 5.4.2 所示电流源电路中, 最适宜产生微安级电流输出的电路为_____。

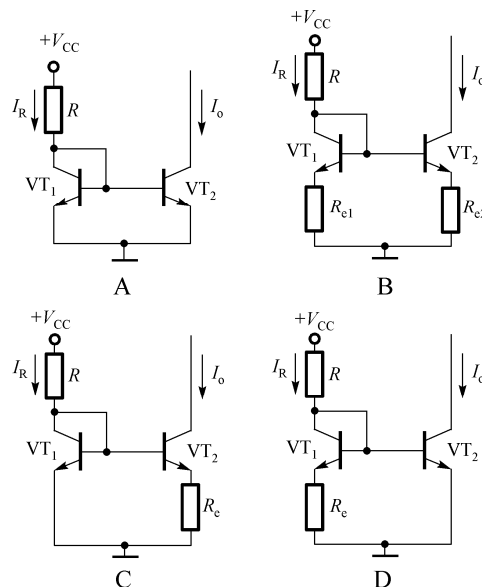


图 5.4.2 题 5.4.20 图

5.4.21 功率放大电路的效率是指_____。

- A. 输出功率与输入功率之比
B. 最大不失真输出功率与电源提供的功率之比
C. 输出功率与功放管上消耗的功率之比
D. 最大不失真输出功率与输入功率之比

5.4.22 甲类功放电路效率低的主要原因是_____。

- A. 只有一个功放管 B. 功放管放大倍数过小
C. 静态电流过大

5.4.23 要实现将正弦波电压转换成 2 倍频电压, 应选用_____运算电路。

- A. 比例 B. 求和 C. 平方 D. 立方

5.5 习题 5

5.5.1 阻容耦合放大电路如图 5.5.1 所示, 已知 $\beta_1 = \beta_2 = 50$, $U_{BEQ} = 0.7V$, 指出每级各是什么组态的电路, 并计算电路的输入电阻 R_i 。

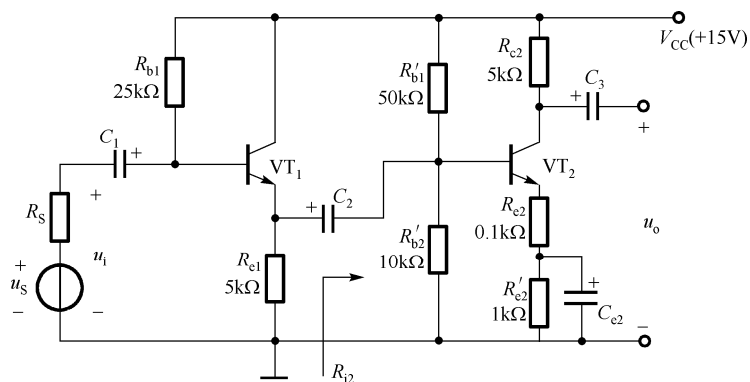


图 5.5.1 习题 5.5.1 电路图

解:

5.5.2 电路如图 5.5.2 所示, 设两管的 $\beta = 100$, $U_{BEQ} = 0.7V$, 求:
(1) I_{CQ1} 、 U_{CEQ1} 、 I_{CQ2} 、 U_{CEQ2} ; (2) A_{u1} 、 A_{u2} 、 A_u 、 R_i 和 R_o 。

解:

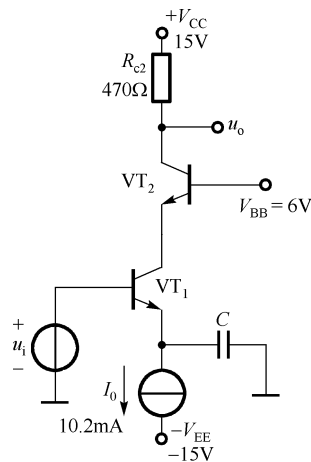


图 5.5.2 习题 5.5.2 电路图

5.5.3 电路如图 5.5.3 所示, 设 VT_1 与 VT_2 的小信号参数分别为 β_1 、 r_{be1} 和 β_2 、 r_{be2} , 图中所有电容对交流可视作短路。(1) 画出放大电路交流通路;(2) 求放大电路的 A_u 、 R_i 和 R_o 。

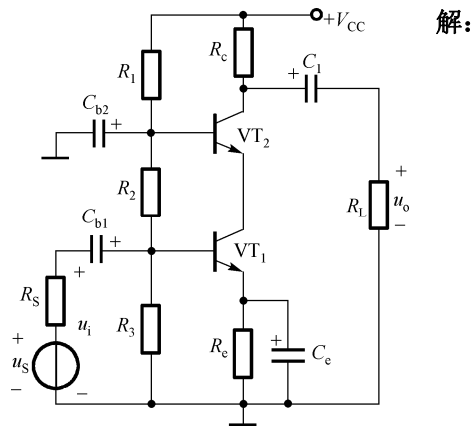


图 5.5.3 习题 5.5.3 电路图

5.5.4 电路如图 5.5.4 所示, 设两管的 $\beta=100$, $U_{BEQ}=0.7V$, 图中所有电容对交流可视作短路。(1) 试求各级的静态工作点;(2) 试求放大电路的 A_u 、 R_i 和 R_o ;(3) 试问后级是什么电路, 其作用是什么?

(4) 设输入一正弦信号时, 输出电压波形出现了顶部失真。若原因是第一级的 Q 点不合适, 问第一级产生了什么失真? 如何消除? 若原因是第二级 Q 点不合适, 问第二级产生了什么失真? 又如何消除?

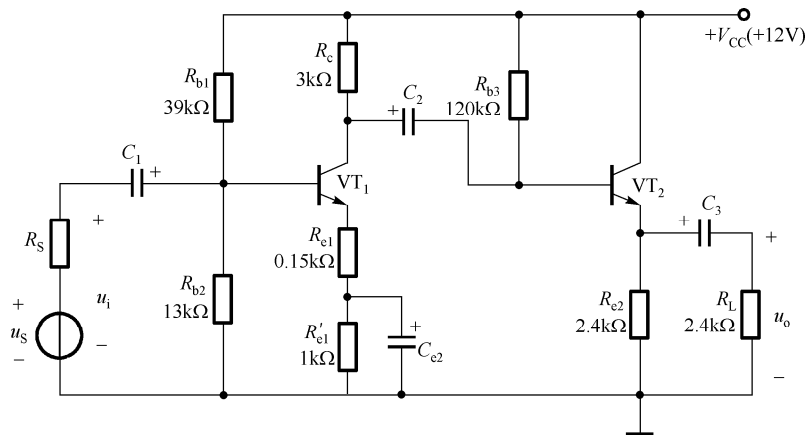


图 5.5.4 习题 5.5.4 电路图

解:

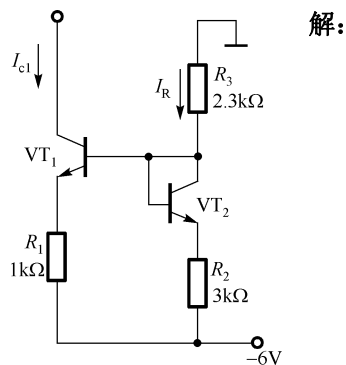


图 5.5.5 习题 5.5.5 电路图

5.5.6 某集成运放的一个单元电路如图 5.5.6 所示, VT_2 、 VT_3 的特性相同, 且 β 足够大, $U_{BE} = 0.7V$, $R = 1k\Omega$ 。问: (1) VT_2 、 VT_3 和 R 组成什么电路? 在电路中起什么作用? (2) 电路中 VT_1 、 R_{e1} 起电平移动作用, 保证 $u_i = 0$ 时, $u_o = 0$, 求 I_{REF} 、 I_{C3} 和 R_{e1} 的值。

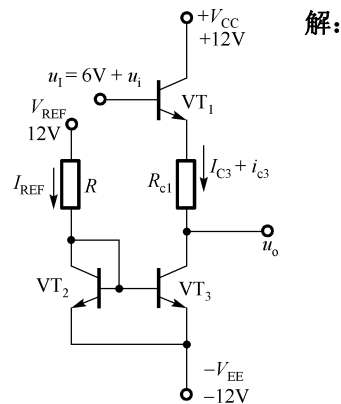


图 5.5.6 习题 5.5.6 电路图

5.5.5 晶体管电路如图 5.5.5 所示, 已知 VT_1 、 VT_2 的特性相同, $\beta = 100$, $U_{BE} = 0.7V$, 试求 I_{C1} 的值。

5.5.7 电流源电路如图 5.5.7 所示, 已知 $I_o = 10\mu\text{A}$, $+V_{CC} = 5\text{V}$, $-V_{EE} = -5\text{V}$, $I_R = 1\text{mA}$ 且 $U_{BE1} = 0.7\text{V}$, 求 R 和 R_e 的值。

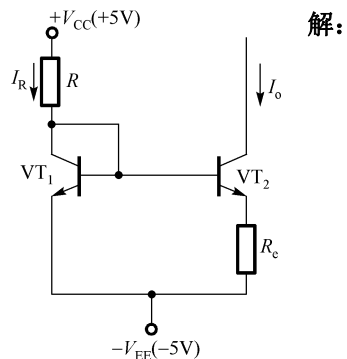


图 5.5.7 习题 5.5.7 电路图

5.5.8 在图 5.5.8 所示电路中, 已知所有晶体管特性均相同, U_{BE} 均为 0.7V , 求 R_{e2} 和 R_{e3} 的阻值。

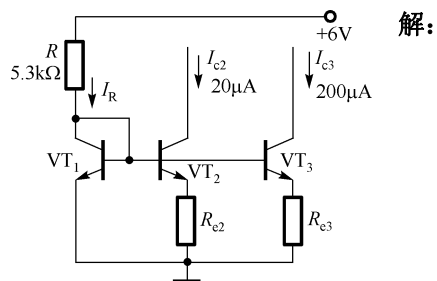


图 5.5.8 习题 5.5.8 电路图

5.5.9 设三极管的参数为 $U_{BE} = 0.7\text{V}$, $\beta = 100$, $V_{CC} = 9\text{V}$, 设计一个输出电流为 $I_o = 1.5\text{mA}$ 的镜像电流源。

解:

5.5.10 已知差动放大电路的输出电压 $u_o = -1000u_{i1} + 999u_{i2}$, 求差模电压增益 A_{ud} 、共模电压增益 A_{uc} 及共模抑制比 K_{CMR} 。

解:

5.5.11 差动放大电路如图 5.5.9 所示，设两管的特性相同， $\beta = 100$ ， $U_{BE} = 0.7V$ ， $u_{i1} = 10mV$ ， $u_{i2} = 30mV$ 。求：（1）共模输入电压 u_{ic} 和差模输入电压 u_{id} ；（2）差模电压放大倍数 $A_{ud} = u_{od} / u_{id}$ ；（3）差模输入电阻 R_{id} 和差模输出电阻 R_{od} 。

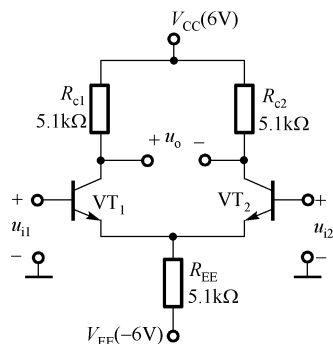
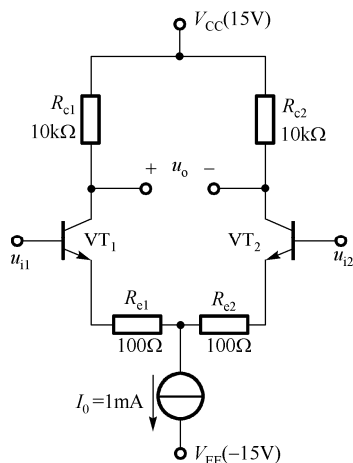


图 5.5.9 习题 5.5.11 电路图

解：

5.5.12 差动放大电路如图 5.5.10 所示，设两管的特性相同， $\beta = 50$ ， $U_{BE} = 0.7V$ 。求：（1）差模电压放大倍数 $A_{ud} = u_{od} / u_{id}$ ；（2）差模输入电阻 R_{id} 和差模输出电阻 R_{od} ；（3）共模抑制比 K_{CMR} 。



解：

图 5.5.10 习题 5.5.12 电路图

5.5.13 差动放大电路如图 5.5.11 所示，设两管的特性相同， $g_m = 2\text{mS}$ 。求：(1) 差模电压放大倍数 $A_{ud} = u_o / u_i$ ；(2) 差模输出电阻 R_{od} ；(3) 共模抑制比 K_{CMR} 。

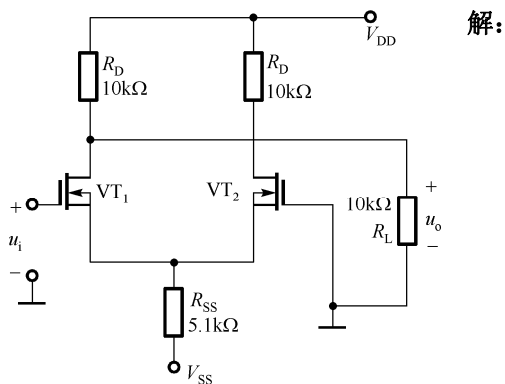


图 5.5.11 习题 5.5.13 电路图

5.5.14 差动放大电路如图 5.5.12 所示，设两管的特性相同， $\beta = 100$ ， r_{ce} 忽略不计。求：(1) 差模电压放大倍数 $A_{ud} = u_o / u_i$ ；(2) 差模输出电阻 R_{od} ；(3) 共模抑制比 K_{CMR} 。

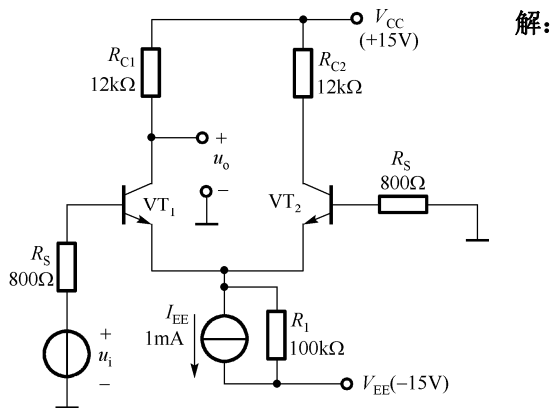


图 5.5.12 习题 5.5.14 电路图

5.5.15 由于功率放大电路中的晶体管常处于接近极限工作的状态，因此，在选择晶体管时必须特别注意哪 3 个参数？

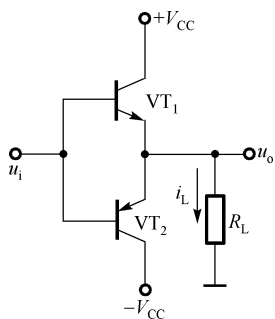
解：

5.5.16 乙类互补对称功率放大电路的效率在理想情况下可以达到多少？

解：

5.5.17 一个双电源互补对称功率放大电路如图 5.5.13 所示，设 $V_{CC}=12\text{V}$ ， $R_L=16\Omega$ ， u_i 为正弦波。求：（1）在晶体管的饱和压降 U_{CES} 可以忽略的情况下，负载上可以得到的最大输出功率 P_{om} ；

（2）每个晶体管的耐压 $|U_{(BR)CEO}|$ 应大于多少；（3）这种电路会产生何种失真，为改善上述失真，应在电路中采取什么措施。



解：

图 5.5.13 习题 5.5.17 电路图

5.5.18 一个单电源互补对称功放电路如图 5.5.14 所示，设 $V_{CC}=12\text{V}$ ， $R_L=8\Omega$ ， C 的电容量很大， u_i 为正弦波，在忽略晶体管饱和压降 U_{CES} 的情况下，试求该电路的最大输出功率 P_{om} 。

解：

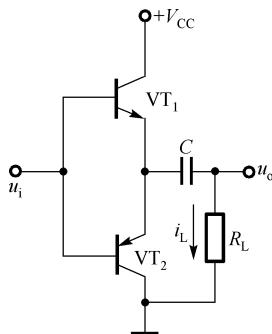


图 5.5.14 习题 5.5.18 电路图

5.5.19 在图 5.5.15 所示的电路中，已知 $V_{CC}=16\text{V}$ ， $R_L=4\Omega$ ， u_i 为正弦波，输入电压足够大，在忽略晶体管饱和压降 U_{CES} 的情况下，试求：（1）最大输出功率 P_{om} ；（2）晶体管的最大管耗 P_{CM} ；（3）晶体管饱和压降 $U_{CES}=1\text{V}$ 时，最大输出功率 P_{om} 和效率 η 。

解：

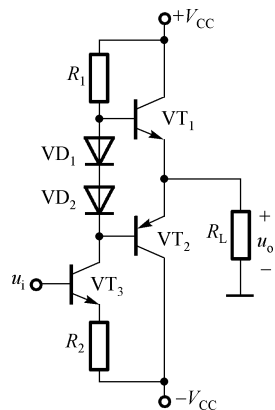


图 5.5.15 习题 5.5.19 电路图

5.5.20 在图 5.5.16 所示单电源互补对称电路中, 已知 $V_{CC} = 24V$, $R_L = 8\Omega$, 流过负载电阻的电流为 $i_o = 0.5\cos\omega t(A)$ 。求: (1) 负载上所能得到的功率 P_o ; (2) 电源供给的功率 P_V 。

解:

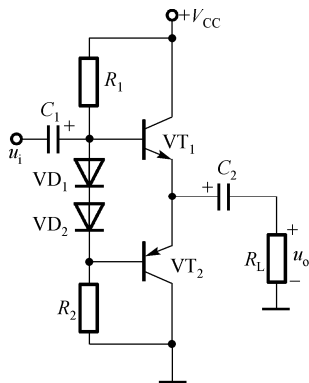


图 5.5.16 习题 5.5.20 电路图

5.5.21 在图 5.5.17 所示的互补对称电路中, 已知 $V_{CC} = 6V$, $R_L = 8\Omega$, 假设三极管的饱和管压降 $U_{CES} = 1V$ 。

- (1) 求电路的最大输出功率 P_{om} ;
- (2) 求电路中直流电源消耗的功率 P_V 和效率 η ;
- (3) 求三极管的最大功耗;
- (4) 求流过三极管的最大集电极电流;
- (5) 求三极管集电极和发射极之间承受的最大电压;
- (6) 求为了在负载上得到最大功率 P_{om} , 输入端应加上的正弦波电压有效值大约等于多少?
- (7) 求比较对图 5.5.17(a)和(b)所示电路的估算结果。

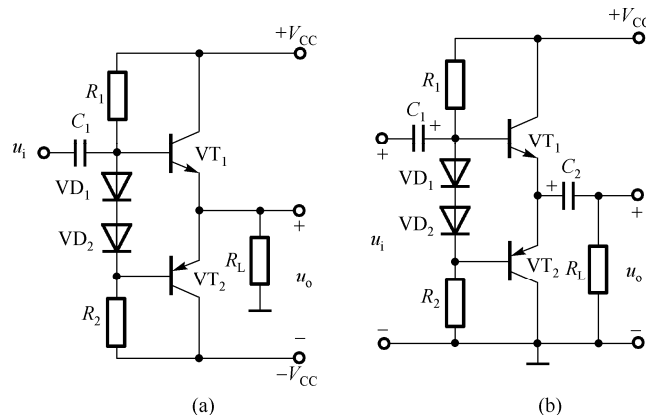


图 5.5.17 习题 5.5.21 电路图

解:

5.5.22 在图 5.5.18 中哪些接法可以构成复合管？哪些等效为 NPN 管？哪些等效为 PNP 管？

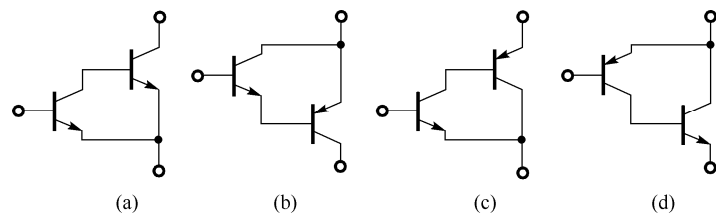


图 5.5.18 习题 5.5.22 电路图

解：

5.5.23 图 5.5.19 所示电路中，三极管为 $\beta_1 = \beta_2 = 50$, $U_{BE1} = U_{BE2} = 0.6\text{V}$ 。

- (1) 求静态时，复合管的 I_C 、 I_B 、 U_{CE} ；
- (2) 说明复合管属于何种类型的三极管；
- (3) 求复合管的 β 。

解:

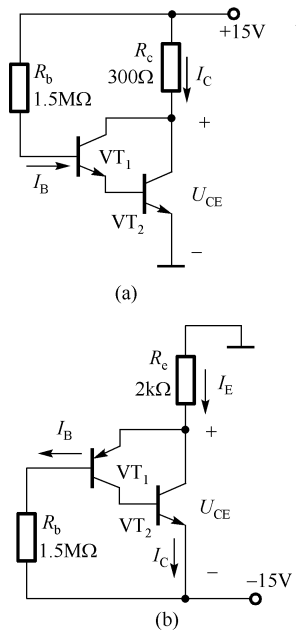


图 5.5.19 习题 5.5.23 电路图

5.5.24 电路如图 5.5.20 所示, 试求电路输出电压的表达式。

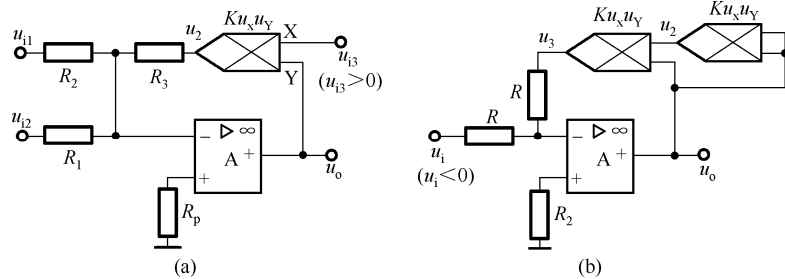


图 5.5.20 习题 5.5.24 电路图

解:

第6章 滤波电路及放大电路 的频率响应

6.1 知识要点总结

一、滤波电路的基本知识

(1) 功能：让输入信号中有用频段的信号通过，抑制或衰减无用的频率成分；能够顺利通过的频率范围称为通带，受阻或衰减的频率范围称为阻带，两者之间的界限频率称为截止频率。

(2) 分类

按有无使用有源器件分为：①无源滤波电路；②有源滤波电路。

按幅频特性不同分为：①低通滤波器；②高通滤波器；③带通滤波器；④带阻滤波器。

二、无源 RC 滤波电路的频率响应

无源 RC 滤波电路的频率响应见表 6.1.1。

三、有源滤波器的实现

一阶有源低通滤波器：可以由一阶 RC 低通电路与一个同相比例运算电路构成，通带电压增益等于同相比例放大电路的电压增益。

二阶有源低通滤波器：在上述的一阶有源滤波器中，在起滤波作

用的 RC 低通电路前面，再加一节 RC 低通电路，可以构成简单的二阶有源低通滤波器。

一阶有源高通滤波器：将一阶低通电路中的 R、C 元件的位置对调构成一阶高通滤波器。

二阶有源高通滤波器：将二阶低通电路中的 R、C 元件的位置对调构成二阶高通滤波器。

带通有源滤波器：将低通滤波器与高通滤波器串联可构成带通滤波器。

带阻有源滤波器：将低通滤波器和高通滤波器的输出经求和电路输出，构成带阻滤波器。

四、放大电路的频率响应

1. 评价三极管高频性能的 3 个特征参数

(1) 共射极截止频率 f_β ：使 $|\dot{\beta}|$ 下降为 $0.707\beta_0$ 时的频率。

(2) 特征频率 f_T ：使 $|\dot{\beta}|$ 下降到 1（即 0dB）时的频率。

(3) 共基极截止频率 f_α ： α 下降为 $0.707\alpha_0$ 时的频率。

关系为： $f_T \approx \beta_0 f_\beta$ ， $f_\alpha = (1 + \beta_0)f_\beta \approx f_\beta + f_T$ ，所以有 $f_\beta \ll f_T < f_\alpha$ 。

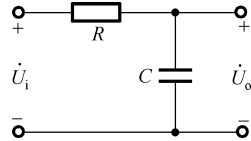
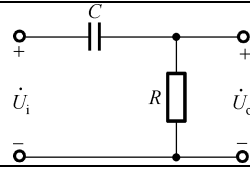
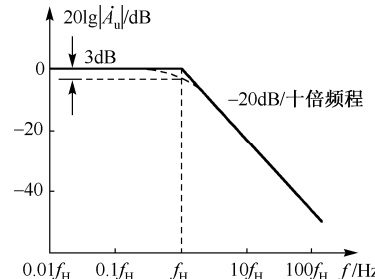
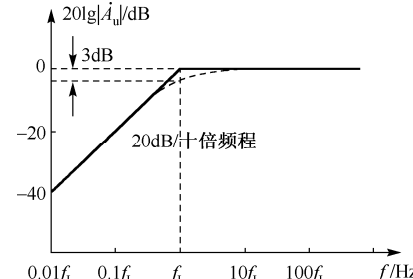
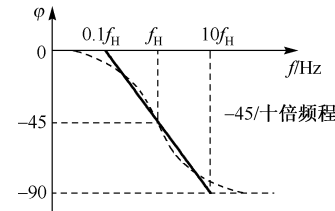
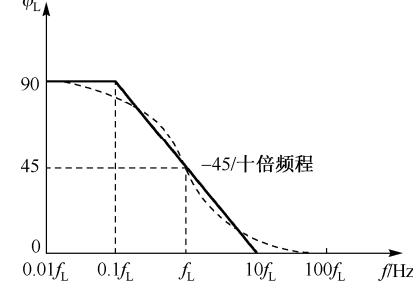
2. 电抗元件对各频段的影响

中频段：电路中的所有电抗影响均可忽略不计，放大器的增益和相角均为常数，不随频率变化。

低频段：影响低频响应的主要因素是耦合及旁路电容，随频率的增大，增益减小并产生附加相移。

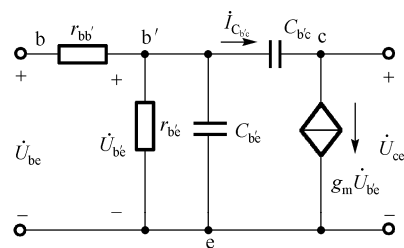
高频段：影响高频响应的主要因素是晶体管极间电容，随频率的减小，增益减小并产生附加相移。

表 6.1.1 RC 电路的频率响应

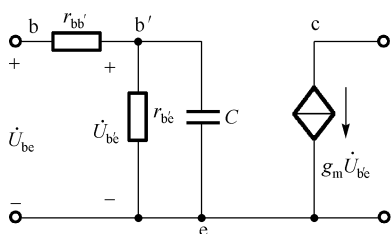
	RC 低通电路	RC 高通电路
电路图		
电压传递函数	$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{1 + jf/f_H}$	$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{1 - jf_L/f}$
幅频特性	$ \dot{A}_u = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}}$	$ \dot{A}_u = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}}$
相频特性	$\varphi = -\arctan(f/f_H)$	$\varphi = \arctan(f_L/f)$
截止频率	上限截止频率 $f_H = \frac{1}{2\pi RC}$	下限截止频率 $f_L = \frac{1}{2\pi RC}$
幅频波特图		
相频波特图		

3. 晶体三极管的混合 π 型等效模型及其单向化简化

晶体三极管的混合 π 型等效模型如图 6.1.1(a)所示, 其单向化简化模型如图 6.1.1(b)所示。



(a) 晶体管混合 π 模型



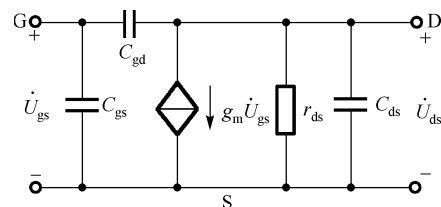
(b) 简化后混合 π 模型

图 6.1.1 晶体管混合 π 模型及其单向化

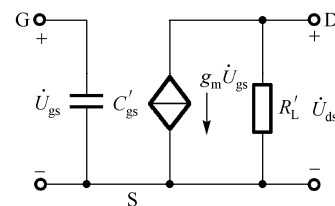
图中, $C = C_{b'e} + (1 - \dot{K})C_{b'c}$ ($\dot{K} = -g_m R'_L$)

4. 场效应管的高频小信号模型及其单向化简化模型

场效应管的高频小信号模型如图 6.1.2(a)所示, 其单向化简化模型如图 6.1.2(b)所示。



(a) 场效应管高频小信号模型



(b) 简化模型

图 6.1.2 场效应管高频小信号电路模型及其简化模型

图中, $C'_{gs} = C_{gs} + C_{M1} = C_{gs} + (1 - \dot{K})C_{gd}$ ($\dot{K} = -g_m R'_L$)

6.2 本章重点与难点

1. 滤波电路的基础知识。
2. 传递函数的推导方法与波特图的画法。
3. 晶体三极管高频等效模型。
4. 场效应管高频等效模型。
5. 单管共发射极放大电路的 f_L 、 f_H 、 A_{usm} 的计算。

6.3 重点分析方法与步骤

一、频率响应分析步骤

(1) 写出电路电压传递函数 $\dot{A}_u = \dot{U}_o / \dot{U}_i$ 。

(2) 求出截止频率 $f_H = \frac{1}{2\pi RC}$ 或 $f_L = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

(3) 将截止频率代入 \dot{A}_u 的表达式, 把 \dot{A}_u 化成典型表达式, 由此判断滤波电路的类型。

(4) 绘制渐进波特图:

$\dot{A}_u \rightarrow \begin{cases} \text{幅频} A(f) \rightarrow \text{横坐标} f \text{ 用对数, 纵坐标 } 20 \lg |\dot{A}_u|, \text{ 单位为 dB} \rightarrow \text{截止频率处 } 20 \lg |\dot{A}_u| \text{ 下降 } 3 \text{ dB} \\ \text{相频 } \varphi(f) \rightarrow \text{横坐标} f \text{ 用对数, 纵坐标 } \varphi, \text{ 单位为度} \end{cases}$

二、放大电路的频率特性分析方法

将放大电路分为 3 个工作区: 低频区、中频区和高频区。画出各区等效电路, 分区进行分析。

(1) 中频区

结电容、分布电容、负载电容视作开路; 直流电源、耦合电容和射极旁路电容视为短路。画出等效电路, 据此求得中频电压放大倍数 \dot{A}_{um} 。

(2) 低频区 (采用短路时间常数法求下限截止频率 f_L)

① 结电容、分布电容、负载电容视为开路, 直流电源对交流信号视为短路, 保留耦合电容和射极旁路电容, 画出等效电路。

② 分别考虑各耦合电容及旁路电容的影响, 考虑某个电容 C_1 时, 其他电容全部短路, 电压源短路, 电流源开路, 求出从电容 C_1 端口视

入的戴维南等效电阻 R_1 , 则 $\tau_1 = R_1 C_1$, $\omega_1 = 1/\tau_1$, 求出各自的下限频

率 $\omega_2 = 1/\tau_2, \omega_3 = 1/\tau_3$ 。总的 $\omega_L \approx \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2}$, $f_L = \omega_L / (2\pi)$ 。

③ 写出频率特性 $\dot{A}_{usL} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + \frac{f_L}{jf}}$ 。

(3) 高频区: 直流电源、耦合电容和射极旁路电容视做短路, 结电容、分布电容、负载电容保留, 画出等效电路, 将此电路进行单向简化, 由于输出回路的时间常数通常比输入回路的小很多, 所以主要考虑输入回路电容的影响, 据此求得上限截止频率 f_H 和频

率特性 $\dot{A}_{usH} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H}}$ 。

(4) 将低频特性表达式和高频特性表达式综合起来, 即为放大电路全频段的频率特性表达式

$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \left(1 + \frac{f_L}{jf}\right)}$$

6.4 填空题和选择题

一、填空题

6.4.1 滤波器在电子系统中的应用十分广泛,某普通电话机电路需要传输 $100\sim 3400\text{Hz}$ 的音频信号,需要选用_____滤波器,医用心电图测试仪需要抑制 50Hz 的交流电源干扰,需要选用_____滤波器。

6.4.2 某放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u 的折线近似幅频特性如图 6.4.1 所示。由此可知,中频电压放大倍数 $|\dot{A}_{um}|$ 为_____倍,下限截止频率为_____,上限截止频率为_____,当信号频率恰好等于上限截止频率或下限截止频率时,该电路的实际电压增益约为_____dB。

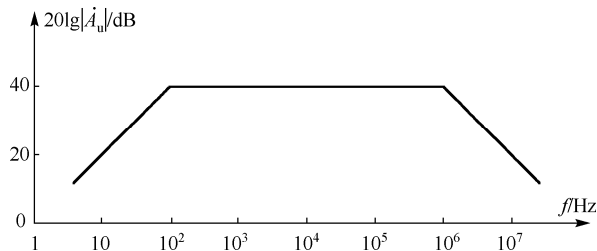


图 6.4.1 题 6.4.2 图

6.4.3 晶体管电流放大系数是频率的函数,随频率的升高而_____ (升高、降低)。共基极电路比共射极电路高频特性_____ (好、坏)。

6.4.4 晶体管的高频参数为 f_T 和 β , 则共射极截止频率 f_{β} 约为_____, 共基极截止频率 f_{α} 约为_____。

6.4.5 在图 6.4.2 所示电路中,如分别改变下列参数,放大电路的指标将如何变化(增大、减小、不变)。

(1)增加电容 C_1 的容量,则中频电压放大倍数 $|\dot{A}_{um}|$ _____, 下限频率 f_L _____, 上限频率 f_H _____。

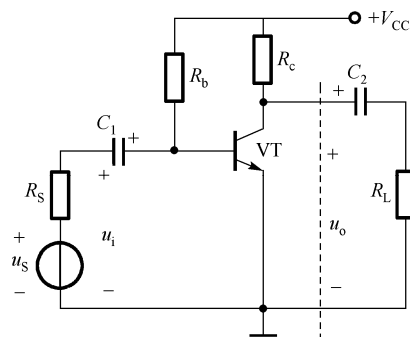


图 6.4.2 共射极阻容耦合放大电路

(2)减小电阻 R_c , 则 $|\dot{A}_{um}|$ _____, 下限频率 f_L _____, 上限频率 f_H _____。

二、选择正确的答案填空

6.4.6 _____ 在 $f=0$ 和 $f=\infty$ 时, 电压增益都等于零; _____ 的直流电压增益就是它的通带增益; 在理想情况下, _____ 在 $f=\infty$ 的电压增益就是它的通带电压增益。

- A. 高通滤波电路
- B. 低通滤波电路
- C. 带通滤波电路
- D. 带阻滤波电路

6.4.7 直流稳压电源中滤波电路的目的是将_____。

- A. 交流变为直流
- B. 高频变为低频
- C. 交、直流混合量中的交流成分滤掉

6.4.8 直流稳压电源中滤波电路应选用_____。

- A. 高通滤波电路
- B. 低通滤波电路
- C. 带通滤波电路

6.4.9 多级放大电路与单级放大电路相比,总的通频带一定比它的任何一级都_____, 级数越多则上限频率 f_H 越_____, 高频附加相移_____。

- A. 大
- B. 小
- C. 宽
- D. 窄

6.5 习题 6

6.5.1 设运放为理想器件。在下列几种情况下，它们分别属于哪种类型的滤波电路（低通、高通、带通、带阻）？并定性画出其幅频特性。

（1）在理想情况下，当 $f = 0$ 和 $f \rightarrow \infty$ 时的电压增益相等，且不为零；

（2）直流电压增益就是它的通带电压增益；

（3）在理想情况下，当 $f \rightarrow \infty$ 时的电压增益就是它的通带电压增益；

（4）在 $f = 0$ 和 $f \rightarrow \infty$ 时，电压增益都等于零。

解：

6.5.2 在下列各种情况下，应分别采用哪种类型（低通、高通、带通、带阻）的滤波电路。

（1）希望抑制 50Hz 交流电源的干扰；

（2）希望抑制 500Hz 以下的信号；

（3）有用信号频率低于 500Hz；

（4）有用信号频率为 500Hz。

解：

6.5.3 一个具有一阶低通特性的电压放大器，它的直流电压增益为 60dB，3dB 频率为 1000Hz。分别求频率为 100Hz、10kHz、100kHz 和 1MHz 时的增益。

解：

6.5.4 电路如图 6.5.1 所示，图中 $C = 0.1\mu\text{F}$ ， $R = 5\text{k}\Omega$ 。

- (1) 确定其截止频率；
- (2) 画出幅频响应的渐进线和 3dB 点。

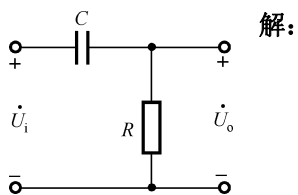


图 6.5.1 习题 6.5.4 电路图

6.5.5 设 A 为理想运放，试推导出图 6.5.2 所示电路的电压放大倍数，并说明这是一种什么类型的滤波电路。

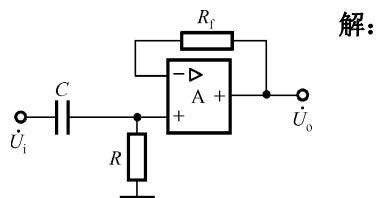


图 6.5.2 习题 6.5.5 电路图

6.5.6 设 A 为理想运放，试推导出图 6.5.3 所示电路的电压放大倍数，并说明这是一种什么类型的滤波电路。

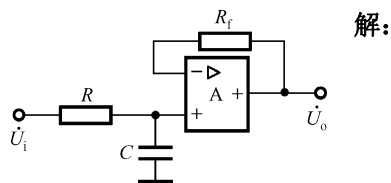


图 6.5.3 习题 6.5.6 电路图

6.5.7 已知图 6.5.2 和图 6.5.3 所示电路的通带截止频率分别为 100Hz 和 100kHz。试用它们构成一个带通滤波器，并画出幅频特性。

解：

6.5.9 在低频段的小信号等效电路中，要考虑哪些电容，不需要考虑哪些电容？在高频段呢？

解：

6.5.8 电路如图 6.5.4 所示，要求 $f_H = 1\text{kHz}$ ， $C = 0.1\mu\text{F}$ ，等效品质因数 $Q=1$ ，试求该电路中的各电阻阻值约为多少。

解：

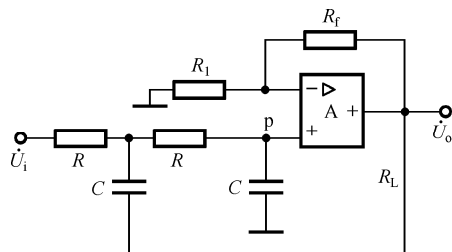


图 6.5.4 习题 6.5.8 电路图

6.5.10 什么是晶体三极管的共射极截止频率？什么是晶体三极管的共基极截止频率？什么是晶体三极管的特征频率？三者之间的关系是什么样的？

解：

6.5.11 放大电路频率响应的分析为什么可以分频段来进行？

解：

6.5.12 已知某放大电路的电压放大倍数为 $\dot{A}_u = \frac{2jf}{\left(1+j\frac{f}{50}\right)\left(1+j\frac{f}{10^6}\right)}$ 。

(1) 求解 \dot{A}_{um} 、 f_L 、 f_H ；

(2) 画出波特图。

解：

6.5.13 已知某放大电路的波特图如图 6.5.5 所示，试写出电压放大倍数 \dot{A}_u 的表达式。

解：

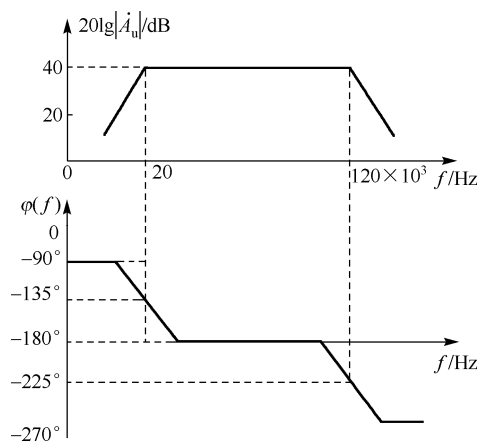


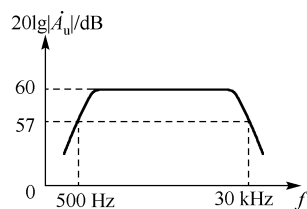
图 6.5.5 习题 6.5.13 电路图

6.5.14 阻容耦合放大器幅频特性如图 6.5.6 所示, 试问:

(1) 给放大器输入 $U_i = 5\text{mV}$, $f = 5\text{kHz}$ 的正弦信号时, 输出电压 U_o 是多少?

(2) 给放大器输入 $U_i = 3\text{mV}$, $f = 30\text{kHz}$ 的正弦信号时, 输出电压 U_o 是多少?

(3) 求该放大器的通频带 f_{BW} 。



解:

图 6.5.6 习题 6.5.14 电路图

6.5.15 在手册上查得某晶体管在 $I_{\text{CQ}} = 4\text{mA}$, $U_{\text{CEQ}} = 6\text{V}$ 时的参数为 $\beta = 150$, $r_{\text{be}} = 1\text{k}\Omega$, $f_{\text{T}} = 350\text{MHz}$, $C_{\text{b'c}} = 4\text{pF}$, 试求混合 π 型等效电路中的 g_{m} 、 $r_{\text{bb'}}$ 、 $r_{\text{b'e}}$ 、 $C_{\text{b'e}}$, 以及 f_{β} 、 f_{α} 。

解:

6.5.16 在图 6.5.7 所示电路中, 已知 $V_{\text{CC}} = 12\text{V}$, $R_{\text{S}} = 1\text{k}\Omega$, $R_{\text{b}} = 910\text{k}\Omega$, $R_{\text{c}} = 5\text{k}\Omega$, $C_{\text{b}} = 5\mu\text{F}$, 三极管的 $\beta = 100$, $r_{\text{bb'}} = 100\Omega$, $U_{\text{BEQ}} = 0.7\text{V}$, $f_{\beta} = 0.5\text{MHz}$, $C_{\text{b'c}} = 5\text{pF}$, 试估算该电路下限截止频率 f_{L} 和上限截止频率 f_{H} , 并写出 A_{us} 的表达式。

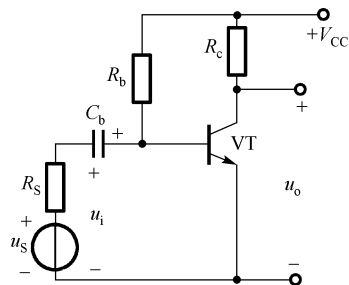


图 6.5.7 习题 6.5.16 电路图

解:

6.5.17 已知电路如图 6.5.8 所示。已知 $R_S = 50\Omega$ ， $R_{b1} // R_{b2} = 10k\Omega$ ， $R_c = 2k\Omega$ ， $R_e = R_L = 1k\Omega$ ， $C_{b1} = 5\mu F$ ， $C_{b2} = 10\mu F$ ， $C_e = 100\mu F$ ，三极管的 $g_m = 80mA/V$ ， $r_{bb'} = 200\Omega$ ， $r_{b'e} = 0.8k\Omega$ ， $C_{b'e} = 100pF$ ， $C_{b'c} = 1pF$ ，试估算该放大电路的通频带。

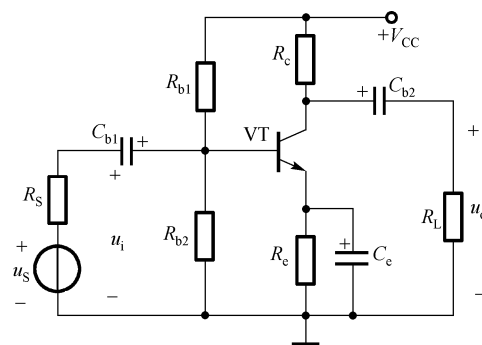


图 6.5.8 习题 6.5.17 电路图

解:

6.5.18 电路如图 6.5.9 所示, 已知三极管的 $\beta = 50$, $r_{be} = 0.72\text{k}\Omega$ 。

- (1) 估算电路的下限频率;
- (2) $U_{im} = 5\text{mV}$, 且 $f = f_L$, 则 $U_{om} = ?$

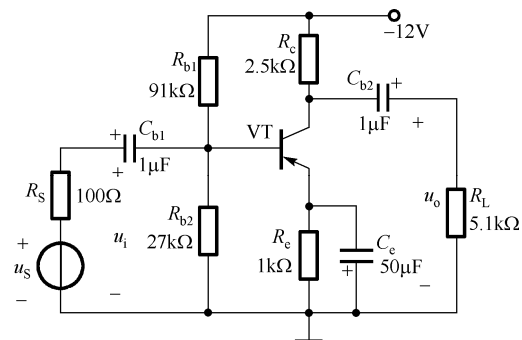


图 6.5.9 习题 6.5.18 和习题 6.5.19 电路图

解:

姓名_____ 学号_____ 班级_____ 序号_____

6.5.19 电路如图 6.5.9 所示，三极管的 $\beta = 40$ ， $r_{bb'} = 100\Omega$ ， $C_{b'e} = 100\text{pF}$ ， $C_{b'c} = 3\text{pF}$ ， $r_{b'e} = 1\text{k}\Omega$ ，画出高频小信号等效电路，求上限频率 f_H 。

解：

6.5.20 场效应管放大电路如图 6.5.10 所示，管子的参数为 $K_n = 1\text{mA/V}^2$ ， $U_{th} = 2\text{V}$ ， $\lambda = 0$ ， $C_{gs} = 5\text{pF}$ ， $C_{gd} = 1\text{pF}$ 。

- (1) 画出简化的高频等效电路；
- (2) 求出小信号电压增益的上限频率 f_H 及中频电压增益 A_{um} 。

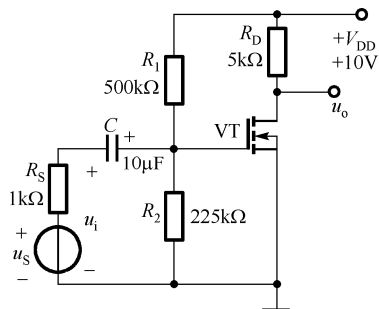


图 6.5.10 习题 6.5.20 电路图

解：

6.5.21 设某三级放大器，各级放大电路的上限截止频率分别为 $f_{H1} = 6\text{kHz}$ ， $f_{H2} = 25\text{kHz}$ ， $f_{H3} = 50\text{kHz}$ ，中频增益为 100，试求该放大器的上限频率。

解：

第7章 负反馈放大电路

7.1 知识要点总结

一、反馈的基本概念

1. 定义

将放大电路输出回路的输出量（电压或电流）通过反馈网络，部分或全部馈送到输入回路中，并能够影响其输入量（输入电压或电流），这种电压或电流的回送过程称为反馈。

放大电路引入反馈后，组成反馈放大电路，图 7.1.1 所示为反馈放大电路的方框图，其由基本放大电路、反馈网络和比较环节组成。开环放大倍数 \dot{A} 、反馈系数 \dot{F} 和闭环放大倍数 \dot{A}_f 的定义为

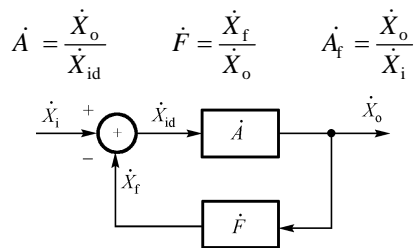


图 7.1.1 反馈放大电路的方框图

开环放大倍数 \dot{A} 和闭环放大倍数 \dot{A}_f 的关系为

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad (7.1.1)$$

2. 反馈的类型

(1) 按反馈极性分

负反馈：反馈信号 \dot{X}_f 削弱原输入信号 \dot{X}_i ，使得净输入信号 $\dot{X}_{id} < \dot{X}_i$ ，多用于改善放大器的性能。

正反馈：反馈信号 \dot{X}_f 增强原输入信号 \dot{X}_i ，使得净输入信号 $\dot{X}_{id} > \dot{X}_i$ ，多用于振荡电路中。

(2) 按交、直流性质分

直流反馈：反馈信号 \dot{X}_f 为直流，用于稳定静态工作点。

交流反馈：反馈信号 \dot{X}_f 为交流，用于改善放大电路的动态性能。

(3) 按输出端取样方式分

电压反馈：在输出端反馈网络与基本放大电路并联，反馈信号取自负载上的输出电压，此时， \dot{X}_o 应用 \dot{U}_o 表示。

电流反馈：在输出端反馈网络与基本放大电路串联，反馈信号取自流过负载的输出电流，此时， \dot{X}_o 应用 \dot{I}_o 表示。

(4) 按输入端连接方式分

串联反馈：在输入端，反馈网络与基本放大电路串联，反馈信号 \dot{X}_f 以电压 \dot{U}_f 的形式出现，并在输入端进行电压比较，即 $\dot{U}_{id} = \dot{U}_i - \dot{U}_f$ 。

并联反馈：在输入端，反馈网络与基本放大电路并联，反馈信号 \dot{X}_f 以电流 \dot{I}_f 的形式出现，并在输入端进行电流比较，即 $\dot{I}_{id} = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ 。

综上所述，负反馈电路有 4 种类型：电压串联、电压并联、电流串联和电流并联。由于不同反馈类型对应不同的输入、输出电量，因此不同类型的反馈电路，其 \dot{A} 、 \dot{F} 和 \dot{A}_f 的含义也不同。

二、负反馈对放大电路性能的影响

1. 使放大倍数降低

负反馈的 $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$ ，由式(7.1.1)可知 $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$ ，即引入负反馈后，放大电路的放大倍数减小了。

2. 提高放大倍数的稳定性

引入负反馈后，闭环放大倍数的相对变化量 dA_f/A_f 只是未加反馈时开环放大倍数相对变化量 dA/A 的 $1/(1 + AF)$ ：

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1 + AF)} \cdot \frac{dA}{A}$$

3. 减小非线性失真

4. 展宽通频带

5. 影响放大电路的输入、输出电阻

串联负反馈：使输入电阻增大。

并联负反馈：使输入电阻减小。

电压负反馈：使输出电阻减小。

电流负反馈：使输出电阻增大。

三、负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作的条件

1. 产生自激振荡的条件

负反馈放大电路产生自激振荡的平衡条件： $\dot{A}\dot{F} = -1$

即幅值平衡条件： $|\dot{A}\dot{F}| = 1$

相位平衡条件： $\phi_A + \phi_F = (2n+1)\pi$ (n 为整数)

则起振条件： $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 及 $\phi_A + \phi_F = (2n+1)\pi$ (n 为整数)

2. 稳定工作的条件

只要产生自激振荡的幅值条件和相位条件不能同时满足，负反馈放大电路就不会产生自激振荡。因此，负反馈放大电路稳定工作的条件是：

(1) 当 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ ，即 $20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 0\text{dB}$ 时，应有 $|\phi_A + \phi_F| < 180^\circ$ 且有 45° 的裕度；

(2) 若 $\phi_A + \phi_F = \pm 180^\circ$ 时，应有 $|\dot{A}\dot{F}| < 1$ ，即 $20\lg|\dot{A}\dot{F}| < 0\text{dB}$ 且有 10dB 的裕度。

7.2 本章内容的重点及难点

1. 反馈的基本概念，反馈极性 & 类型的判断。
2. 负反馈对放大器性能的影响。
3. 深度负反馈条件下增益的近似计算。

7.3 重点分析方法及步骤

一、判别反馈的方法

1. 有无反馈的判别

看有无连接放大电路输出回路和输入回路的连线、反馈元件或反馈网络，且是否由此对净输入信号的大小产生影响。

2. 反馈类型的判别

(1) 短路法

判断电压反馈与电流反馈：将放大电路交流通路输出端对地短路，若反馈不再起作用，则为电压反馈，否则为电流反馈。

判断串联反馈与并联反馈：将放大电路交流通路输入端对地短路，若反馈作用消失，则为并联反馈，否则为串联反馈。

(2) 根据电路结构判断

若基本放大电路的输出端、反馈网络和负载三者并接在一起，则为电压反馈，否则为为电流反馈。

若基本放大电路的输入端、反馈网络和输入信号源三者并接在一起，则为并联反馈，否则为串联反馈。

3. 正、负反馈的判别

瞬时极性法判断的步骤如下：

(1) 假设输入电压瞬时极性为 (+) → 经基本放大电路，判断输出电压的瞬时极性为 (+) 还是为 (-) → 经反馈网络判断反馈信号 \dot{X}_f 的瞬时极性是 (+) 还是为 (-)。

(2) 比较 \dot{X}_i 与 \dot{X}_f 的极性，若 \dot{X}_i 与 \dot{X}_f 同相，使得 $\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f$ 减小，则为负反馈，否则为正反馈。

注意：串联反馈与并联反馈比较的电量不同：若是串联反馈，则可以直接利用电压极性进行比较 ($\dot{U}_{id} = \dot{U}_i - \dot{U}_f$)；若是并联反馈，则需要根据有关电压的瞬时极性，标出相应电流的流向，然后再用电流进行比较 ($\dot{I}_{id} = \dot{I}_i - \dot{I}_f$)。

二、深度负反馈条件下 \dot{A}_{uf} 的估算

将 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 称为深度负反馈条件，当满足深度负反馈条件时， \dot{A}_{uf} 可以采用以下两种方法进行估算。

(1) 利用公式 $\dot{A}_f \approx 1/\dot{F}$ 进行估算，具体分析步骤如下：

- ① 根据反馈类型确定 \dot{F} 的含义，并计算 $\dot{F} = \dot{X}_f / \dot{X}_o$ ；
- ② 确定 $\dot{A}_f = \dot{X}_o / \dot{X}_i$ 的含义，计算 $\dot{A}_f \approx 1/\dot{F}$ ；
- ③ 将 \dot{A}_f 转换为 $\dot{A}_{uf} = \dot{U}_o / \dot{U}_i$ (除电压串联负反馈外)。

(2) 利用公式 $\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$ 进行估算

$$\dot{X}_f \approx \dot{X}_i, \text{ 即 } \dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f \approx 0 \begin{cases} \dot{U}_{id} \approx 0, \text{ 称为虚短路 (串联负反馈)} \\ \dot{I}_{id} \approx 0, \text{ 称为虚断路 (并联负反馈)} \end{cases}$$

对于串联负反馈：令 $\dot{U}_{id} \approx 0$ ，则 $\dot{U}_f \approx \dot{U}_i$ ，再令 $\dot{I}_{id} \approx 0$ 即输入端开路。求出 \dot{U}_o 与 \dot{U}_i 之间的关系，整理得 \dot{A}_{uf} 。

对于并联负反馈：令 $\dot{I}_{id} \approx 0$ ，则 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$ ，再令 $\dot{U}_{id} \approx 0$ 即输入端短路。求出 \dot{U}_o 与 \dot{I}_i 之间的关系，利用 $\dot{I}_i \approx \dot{U}_i / R_s$ ，整理得 \dot{A}_{uf} 。

7.4 填空题和选择题

一、填空题

7.4.1 反馈放大电路是一个由基本放大电路和_____构成的闭合环路。

7.4.2 欲得到电流-电压转换电路，应在放大电路中引入_____负反馈；欲将电压信号转换成与之成比例的电流信号，应在放大电路中引入_____负反馈；欲减小电路从信号源索取的电流，增大带负载能力，应在放大电路中引入_____负反馈；欲从信号源获得更大的电流，并稳定输出电流，应在放大电路中引入_____负反馈。

7.4.3 负反馈对放大电路工作性能的影响是_____ (增大、降低) 放大电路的放大倍数，提高它的稳定性。

7.4.4 在放大电路中，为了稳定静态工作点，可以引入_____负反馈。

7.4.5 放大电路引入负反馈后，设反馈系数为 F ，则电路的闭环增益 A_f 与开环增益 A 之间的关系是 $A_f = \frac{A}{1 + AF}$ 。若电路满足深度负反馈条件，则 $A_f \approx \frac{1}{F}$ 。

7.4.6 电压负反馈能稳定输出电压, 电流负反馈能稳定_____。

7.4.7 已知放大电路输入电压为 1mV 时, 输出电压为 1V , 加入负反馈后, 为达到同样输出时的输入电压为 10mV , 该电路引入反馈后的电压增益为_____, 反馈系数约为_____。

7.4.8 图 7.4.1 所示的反相比例电路引入_____负反馈, 如果增大电阻 R_f , 则该电路的放大倍数将_____ (增大、减小), 通频带将_____ (增大、减小)。

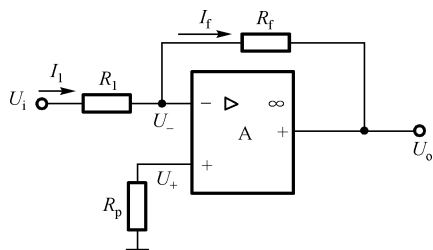


图 7.4.1 题 7.4.8 图

二、选择正确的答案填空

7.4.9 对于放大电路, 所谓开环是指_____。

- A. 无信号源 B. 无反馈通路 C. 无电源 D. 无负载

7.4.10 对于放大电路, 所谓闭环是指_____。

- A. 考虑信号源内阻 B. 存在反馈通路
C. 接入电源 D. 接入负载

7.4.11 在输入量不变的情况下, 若引入反馈后_____, 则说明引入的反馈是负反馈。

- A. 输入电阻增大 B. 输出量增大
C. 净输入量增大 D. 净输入量减小

7.4.12 直流负反馈是指_____。

- A. 直接耦合放大电路中所引入的负反馈

B. 放大直流信号时才有的负反馈

C. 在直流通路中的负反馈

D. 只存在于阻容耦合电路中的负反馈

7.4.13 交流负反馈是指_____的反馈。

A. 交流闭环放大倍数为负数 B. 交流闭环放大倍数变小

C. 交流闭环放大倍数变大

7.4.14 要增大放大器的输入电阻及输出电阻, 应引入_____负反馈。

A. 电流并联

B. 电压串联

C. 电流串联

D. 电压并联

7.4.15 构成反馈通路的元器件_____。

A. 只能是三极管、集成运放等有源器件

B. 只能是电阻元件

C. 只能是无源器件

D. 可以是无源器件也可以是有源器件

7.5 习题 7

7.5.1 什么叫反馈？负反馈有哪几种类型？

解：

7.5.2 负反馈放大电路一般由哪几部分组成？试用方框图说明它们之间的关系？

解：

7.5.3 在图 7.5.1 所示的各电路中，请指明反馈网络是由哪些元件组成的，判断引入的是正反馈还是负反馈？是直流反馈还是交流反馈？设所有电容对交流信号可视为短路。

解：

7.5.4 试判断图 7.5.1 所示的各电路的交流反馈组态。

解：

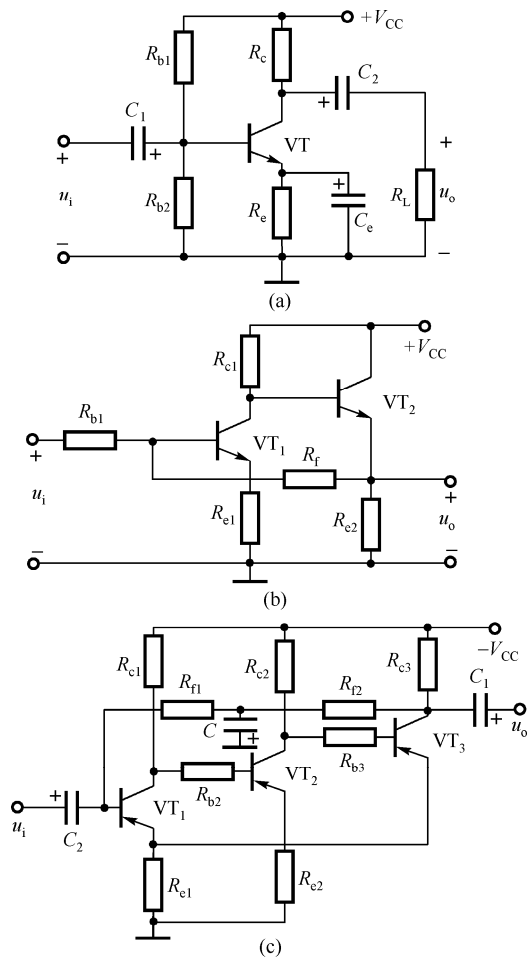


图 7.5.1 习题 7.5.3 和习题 7.5.4 电路图

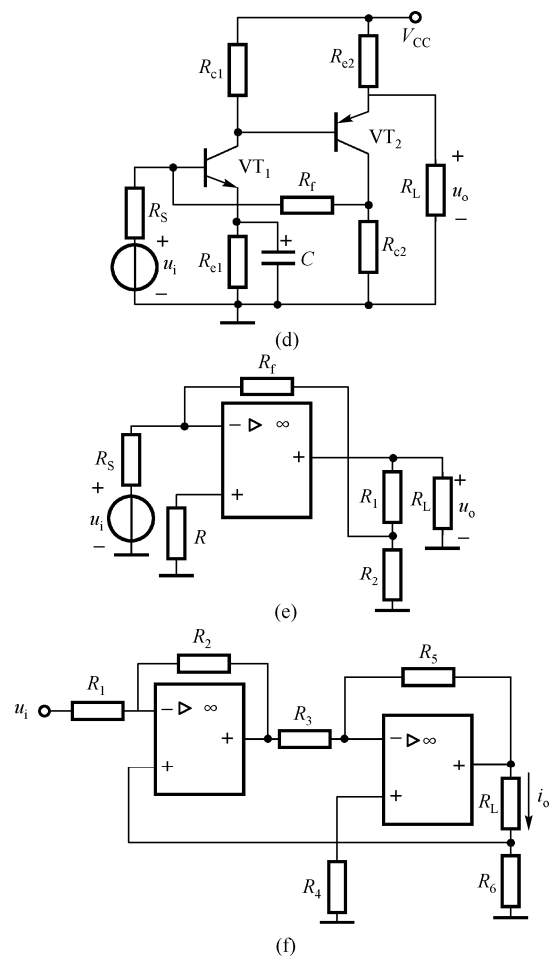
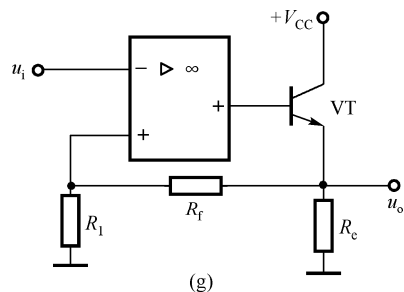
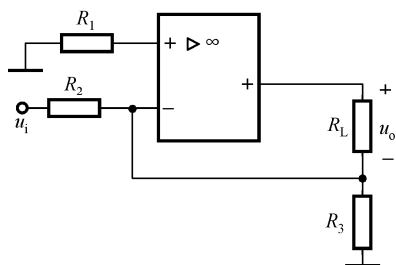


图 7.5.1 (续) 习题 7.5.3 和习题 7.5.4 电路图



(g)



(h)

图 7.5.1 (续) 习题 7.5.3 和习题 7.5.4 电路图

7.5.5 某反馈放大电路的方框图如图 7.5.2 所示, 已知其开环电压增益 $\dot{A}_u = 2000$, 反馈系数 $\dot{F}_u = 0.0495$ 。若输出电压 $\dot{U}_o = 2\text{V}$, 求输入电压 \dot{U}_i 、反馈电压 \dot{U}_f 及净输入电压 \dot{U}_{id} 的值。

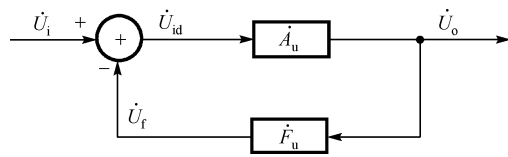


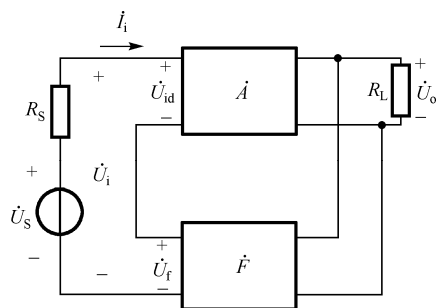
图 7.5.2 习题 7.5.5 电路图

解:

7.5.6 一个放大电路的开环增益为 $A_{uo} = 10^4$, 当它连接成负反馈放大电路时, 其闭环电压增益为 $A_{uf} = 60$, 若 A_{uo} 变化 10%, 问 A_{uf} 变化了多少?

解:

7.5.7 图 7.5.3 所示的电压串联负反馈放大电路采用基本的电压放大器, $U_i = 100\text{mV}$, $U_f = 95\text{mV}$, $U_o = 10\text{V}$ 。相对应的 A 和 F 分别为多少?



解:

图 7.5.3 习题 7.5.7 电路图

7.5.9 某电压反馈的放大器采用一个增益为 100V/V 且输出电阻为 1000Ω 的基本放大器。反馈放大器的闭环输出电阻为 100Ω 。确定其闭环增益。

解：

7.5.8 图 7.5.4 所示的电流串联负反馈放大电路采用基本的电压放大器， $U_i=100\text{mV}$ ， $U_f=95\text{mV}$ ， $I_o=10\text{mA}$ 。相对应的 A 和 F 分别为多少？

解：

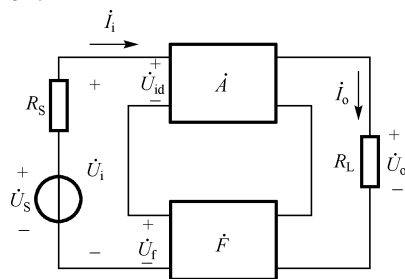


图 7.5.4 习题 7.5.8 电路图

7.5.10 某电压串联负反馈放大器采用一个输入与输出电阻均为 $1\text{k}\Omega$ 且增益 $A=2000\text{V/V}$ 的基本放大器。反馈系数 $F=0.1\text{V/V}$ 。求闭环放大器的增益 A_{uf} 、输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

解：

7.5.11 为了满足下列要求，在放大电路中应当分别引入什么类型的负反馈：

- (1) 某放大电路的信号源内阻很小，要求有稳定的输出电压；
- (2) 要求得到一个电流控制的电流源。

解：

7.5.12 在图 7.5.5 所示的多级放大电路的交流通路中, 按下列要求分别接成所需的两极反馈放大电路: (1) 电路参数变化时, u_o 变化不大, 并希望有较小的输入电阻 R_{if} ; (2) 当负载变化时, i_o 变化不大, 并希望放大器有较大的输入电阻 R_{if} 。

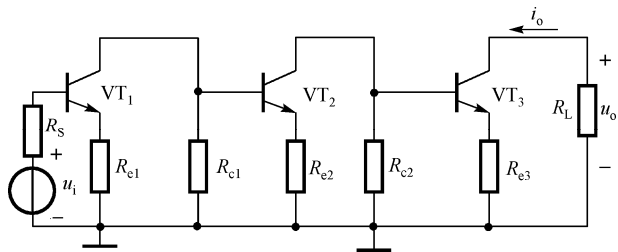
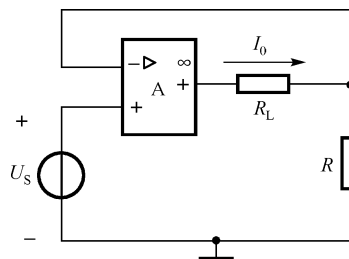


图 7.5.5 习题 7.5.12 电路图

解:

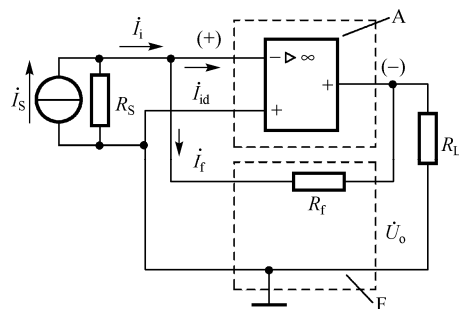
7.5.13 判断图 7.5.6 所示电路的反馈类型和性质, 写出 I_o 的表达式, 并说明电路的特点。



解:

图 7.5.6 习题 7.5.13 电路图

7.5.14 电路如图 7.5.7 所示, 试用虚短概念近似计算它的互阻增益 \dot{A}_{Rf} , 并定性分析它的输入电阻和输出电阻。



解:

图 7.5.7 习题 7.5.14 电路图

7.5.15 在图 7.5.1(b)、(c)、(e)所示各电路中, 在深度负反馈的条件下, 试近似计算它的闭环增益和闭环电压增益。

解:

7.5.16 反馈放大电路如图 7.5.8 所示, (1) 指明级间反馈元件, 并判别反馈类型; (2) 若电路满足深度负反馈的条件, 求其电压放大倍数 \dot{A}_{uf} 的表达式; (3) 现在要求放大电路有较低的输入电阻, 并有稳定的输出电压, 问如何改接 R_f 。请在电路图中画出改接后的反馈路径, 并适当修改放大电路的级间连线, 保证修改后的反馈放大电路能满足要求。

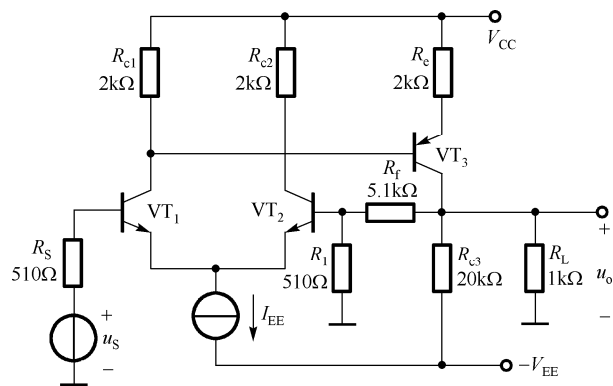


图 7.5.8 习题 7.5.16 电路图

解:

7.5.17 试指出图 7.5.9 所示电路能否实现 $i_L = \frac{u_i}{R}$ 的压控电流源的功能，若不能，应该如何改正？

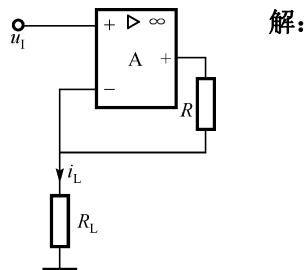


图 7.5.9 习题 7.5.17 电路图

7.5.18 反馈放大电路如图 7.5.10 所示：（1）指明级间反馈元件，并判别反馈类型和性质；（2）若电路满足深度负反馈的条件，求其电压放大倍 \dot{A}_{uf} 的表达式；（3）若要求放大电路有稳定的输出电流，问如何改接 R_f 。请在电路图中画出改接的反馈路径，并说明反馈类型。

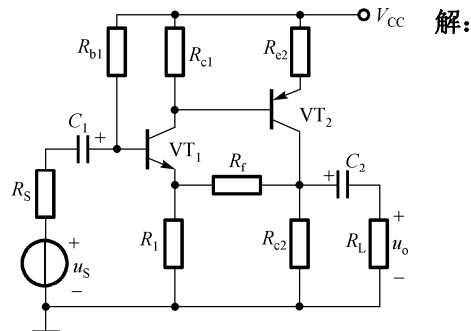


图 7.5.10 习题 7.5.18 电路图

7.5.19 电路如图 7.5.11 所示，A 是放大倍数为 1 的隔离器。（1）指出电路中的反馈类型（正或负、交流或直流、电压或电流、串联或并联）；（2）试从静态与动态量的稳定情况（如稳定静态工作点、稳定输出电压或电流、输入与输出电阻的大小及对信号源内阻的要求等方面分析电路有什么特点；（3）若满足深度负反馈，估算中频时的电压放大倍数 $\dot{A}_{u_{fs}}$ 。

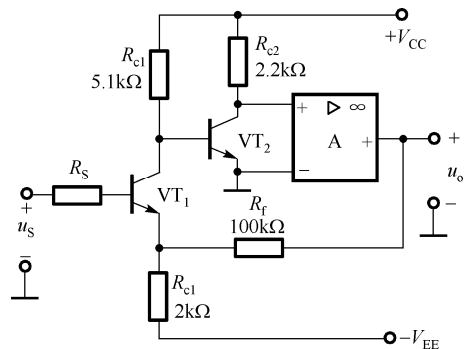


图 7.5.11 习题 7.5.19 电路图

解:

7.5.20 反馈放大电路如图 7.5.12 所示, 各电容对交流呈短路, 已知 $R_{e1} = 750\Omega$, $R_{e2} = 1k\Omega$, $R_S = 1k\Omega$, $R_{c2} = 4k\Omega$, $R_L = 1k\Omega$, $R_f = 10k\Omega$, R_{b1} 和 R_{b2} 忽略不计。(1) 指明级间反馈元件, 并判别反馈类型;(2) 若电路满足深度负反馈的条件, 求其源电压增益 $\dot{A}_{u_{fs}}$ 。

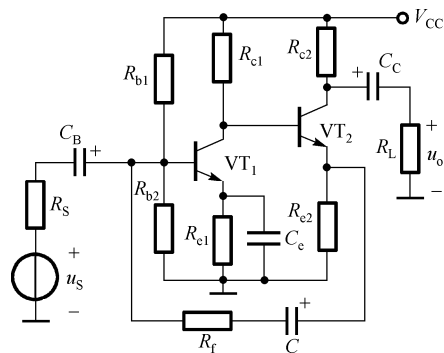


图 7.5.12 习题 7.5.20 电路图

解:

第 8 章 波形产生电路

8.1 知识要点总结

一、正弦波产生电路

1. 正弦波振荡电路的振荡条件

- (1) 平衡条件: $\dot{A}\dot{F} = 1$ $\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \text{ (振幅平衡条件)} \\ \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \text{ (相位平衡条件)} \end{cases}$
- (2) 起振条件: $\dot{A}\dot{F} > 1$ $\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| > 1 \text{ (振幅起振条件)} \\ \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \text{ (相位起振条件)} \end{cases}$

相位条件实际上是正反馈条件, 因此判断一个电路是否能产生振荡, 首先要判断该电路是否有正反馈, 判断方法是第 7 章讨论的瞬时极性法。

2. 正弦波振荡电路的分类和电路结构

(1) 分类

通常, 根据选频网络的不同, 可将正弦波产生电路分为 RC 正弦波振荡电路、LC 正弦波振荡电路和石英晶体正弦波振荡电路。

(2) 电路结构

正弦波振荡电路由 4 部分组成: 放大电路、选频网络、正反馈网络和稳幅网络。

二、RC 文氏桥正弦波振荡电路

1. RC 串并联选频网络的频率特性

RC 文氏桥正弦波振荡电路是采用 RC 串并联网络作为选频网络的正弦波振荡电路。RC 串并联网络的电压传输特性为

$$\dot{F} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)}$$

当 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时, 幅值出现最大值, $|F|_{\max}$ 为 $1/3$, 而相移 ϕ_F 为零。

2. RC 文氏桥振荡电路

RC 文氏桥振荡电路如图 8.1.1 所示。该电路的振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$, 起振条件 $R_f > 2R_1$, 可选用热敏电阻作为稳幅措施, 即选用 R_1 为正温度系数的热敏电阻或选用 R_f 为负温度系数的热敏电阻。

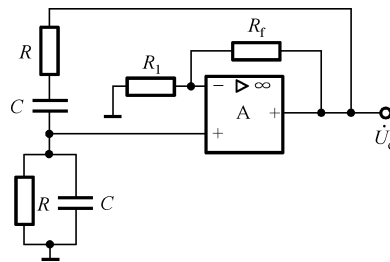


图 8.1.1 RC 文氏桥正弦波振荡电路

三、LC 正弦波振荡电路

LC 正弦波振荡电路是以 LC 并联电路作为选频网络的正弦波振荡电路，一般用于 1MHz 以上的正弦波产生电路。常用电路有变压器反馈式、电感三点式和电容三点式 3 种。

1. LC 并联电路的选频特性

通常，LC 并联电路的损耗很小，满足 $\omega L \gg r$ 。LC 并联电路阻抗的频率特性（如图 8.1.2 所示）包括幅频特性和相频特性。

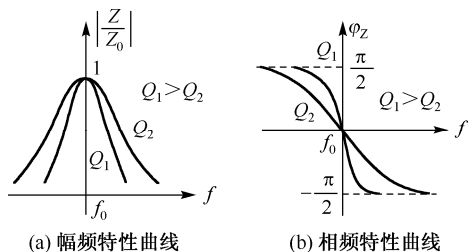


图 8.1.2 LC 并联电路的频率响应

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时，产生并联谐振，回路等效阻抗达到最大值 $Z_0 = \frac{L}{rC}$ ，为纯电阻性，相角 $\varphi_Z = 0$ ；当 $\omega > \omega_0$ 时，LC 电路呈容性， $\varphi_Z < 0$ ；当 $\omega < \omega_0$ 时，LC 电路呈感性， $\varphi_Z > 0$ 。而且品质因数 $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 越大，在 ω_0 处曲线越陡，相角变化越快。所以 LC 电路具有频率选择性， Q 越大，频率的选择性越好。

2. LC 三点式振荡器

三点式是指晶体管的 3 个极与 LC 回路的 3 个点分别相连接，根

据连接方式不同，分为电感三点式和电容三点式，也称为电感反馈式和电容反馈式。它们的交流通路如图 8.1.3 所示。

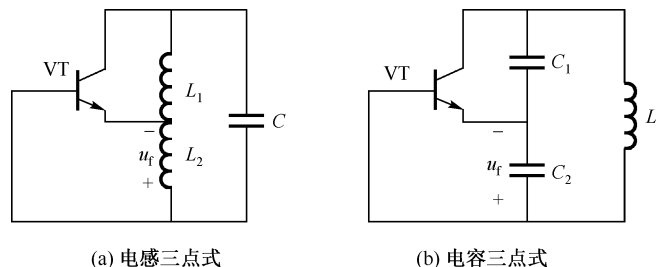


图 8.1.3 三点式 LC 正弦波振荡电路的交流通路

振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，电感三点式 $L = L_1 + L_2 + 2M$ ，电容三点式 $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ 。

四、石英晶体振荡器

1. 石英晶体的特性

石英晶体振荡器的符号和等效电路如图 8.1.4 所示。

由石英晶体的等效电路图可知，它有两个谐振频率：串联谐振频率 f_s 和并联谐振频率 f_p 。 C_q 、 L_q 和 r_q 构成串联谐振回路，因此串联谐振频率为

$$f_s \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}}$$

C_q 、 L_q 、 r_q 和 C_0 构成并联谐振回路，则并联谐振频率为

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q \frac{C_q C_0}{C_q + C_0}}}$$

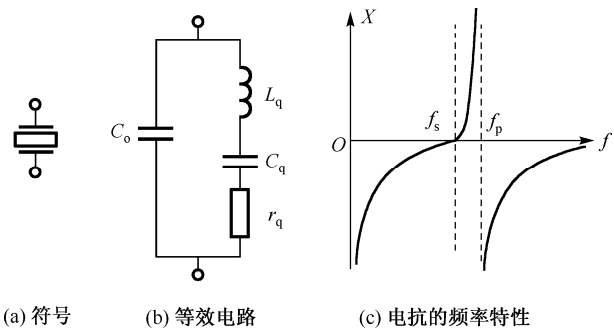


图 8.1.4 石英晶体谐振器符号、等效电路与电抗频率特性

在频率 f_s 和 f_p 之间，石英晶体呈感性；频率等于 f_s 时，近似为短路；频率等于 f_p 时，近似为开路，即为纯电阻性；其余频率下，石英晶体均呈电容性。

2. 石英晶体正弦波振荡电路

根据石英晶体的特性，在正弦波振荡电路中，石英晶体可作为等效电感和短路元件，由此构成并联型石英晶体振荡电路和串联型石英晶体振荡电路。

五、非正弦波产生电路

1. 电压比较器

功能：比较两个电压的大小，并可任意形状和幅值的波形整形为矩形波。

运放工作状态：通常为开环或正反馈状态，输出只有高、低两种电平，因此集成运放工作在线性区。

2. 比较器分类

(1) 按进行比较的电压 U_i 与参考电压 U_{REF} 接入方式不同，分为

串联型和并联型。串联型 U_i 与 U_{REF} 从运放的不同输入端输入，并联型 U_i 与 U_{REF} 从运放的同一输入端输入。

(2) 按 U_i 的输入端子不同，分为同相输入和反相输入。同相输入 U_i 接运放的同相端，反相输入 U_i 接运放的反相端。

(3) 按门限电压的不同，可分为单门限电压比较器、迟滞电压比较器和窗口电压比较器等。单门限电压比较器灵敏度高，抗干扰能力差；迟滞电压比较器抗干扰能力强，但灵敏度较低。

3. 方波发生器和三角波发生器

非正弦波产生电路由迟滞比较器和延时电路组成。方波发生器由迟滞比较器和 RC 充放电电路组成，三角波发生器由迟滞比较器和积分电路构成。求方波、三角波发生器的振荡频率，只要找出使比较器翻转所需的时间即可求出。

8.2 本章重点与难点

1. 正弦波振荡电路的振荡条件和电路的组成。
2. 根据相位平衡条件判断电路是否能振荡。
3. RC 文氏桥振荡电路的组成、振荡频率、起振条件、稳幅措施。
4. 各种电压比较器的特点，电压传输特性曲线的绘制。

8.3 重点分析方法与步骤

1. 判断电路是否产生正弦波振荡的步骤和方法

(1) 观察放大电路的组态，判断电路是否有放大能力。直流通路和交流通路必须正确，且增益足够大。当电路是共射 (CE) 时，集电极输出电压与基极输入电压的极性相反，即两者相位差为 $\varphi_A = 180^\circ$ ；当电路是共基极 (CB) 时，集电极输出电压与发射极输入电压的极性相同，即两者相位差为 $\varphi_A = 0^\circ$ 。

(2) 观察反馈信号 u_f 和输出信号 u_o 之间是否有反馈网络和选频网络。观察 u_f 与 u_o 之间是否有倒相, 若有, 则 $\varphi_F = 180^\circ$, 否则 $\varphi_F = 0$ 。常用的选频网络有 RC、LC、石英晶体。

(3) 判断 $\varphi_A + \varphi_F$ 是否满足相位平衡条件, 由于幅值条件容易满足, 当电路满足相位平衡条件时, 可判断电路可能产生振荡。

2. 绘制电压比较器的电压传输特性的步骤和方法

绘制电压传输特性的 3 个要素是: 门限电压 U_T 、高低电平 U_{OH} 、 U_{OL} 和状态的翻转方向。分析步骤如下。

(1) 根据电路的结构判断电压比较器的类型。若电路是开环的, 则是简单电压比较器。简单电压比较器只有一个门限电压。若存在正反馈, 就是迟滞电压比较器, 它有两个门限电压。

(2) 求门限电压 U_T 。电压比较器不具有“虚短”的特性, 但在电路的输出状态发生变化的瞬间, 集成运放的同相和反相端的电压相等, 所以令 $u_+ = u_-$ 求出输入电压 U_i , 该 U_i 即为门限电压 U_T 。

(3) 确定输出电压的高低电平 U_{OH} 、 U_{OL} 。若输出端无稳压二极管限幅, $U_o \approx \pm V_{CC}$; 若输出端接有双向稳压二极管, 则 $U_o \approx \pm U_Z$ 。

(4) 确定输出状态发生变化时的方向:

① 同相输入的比较器, $U_o = U_{OH}$ 时, 曲线水平部分往横轴的正方向延伸, $U_o = U_{OL}$ 时, 曲线水平部分往横轴的负方向延伸;

② 反相输入的比较器, $U_o = U_{OH}$ 时, 曲线水平部分往横轴的负方向延伸, $U_o = U_{OL}$ 时, 曲线水平部分往横轴的正方向延伸。

8.4 填空题和选择题

一、填空题

8.4.1 正弦波振荡电路产生振荡的平衡条件为_____。

8.4.2 设集成运放的最高输出电压为 $\pm U_{om}$, 则由它组成的运算电路的电压输出范围为_____, 电压比较器的输出为_____。

8.4.3 根据石英晶体的电抗特性, 当 $f = f_s$ 时, 石英晶体呈现_____性; 在 $f_s < f < f_p$ 的很窄频率范围内石英晶体呈_____性; 当 $f < f_s$ 或 $f > f_p$ 时, 石英晶体呈_____性。

8.4.4 在串联型石英晶体振荡电路中, 晶体等效为_____; 而在并联型石英晶体振荡电路中, 晶体等效为_____。

8.4.5 单门限比较器只有_____个门限电压, 而迟滞比较器则有_____个门限电压值。

8.4.6 若希望在 $u_i < +3V$ 时, u_o 有高电平, 而在 $u_i > +3V$ 时, u_o 有低电平, 则可以采用反相输入的_____电压比较器。

8.4.7 制作频率为 20MHz 且非常稳定的测试用信号源, 应选用_____作为选频网络。

二、选择正确的答案填空

8.4.8 与迟滞电压比较器相比, 单门限电压比较器_____。

A. 灵敏度高, 抗干扰能力差 B. 灵敏度低, 抗干扰能力差
C. 灵敏度高, 抗干扰能力强 D. 灵敏度低, 抗干扰能力强

8.4.9 与单门限电压比较器相比, 迟滞电压比较器_____。

A. 抗干扰能力差, 灵敏度高 B. 抗干扰能力差, 灵敏度低
C. 抗干扰能力强, 灵敏度高 D. 抗干扰能力强, 灵敏度较低

8.4.10 频率为 20Hz~20kHz 的音频信号发生电路, 应选用_____作为选频网络。

A. RC 串并网络 B. LC 并网络 C. 石英晶体

8.4.11 正弦波振荡器的起振条件是_____。

A. $\dot{A}\dot{F} = 1$ B. $\dot{A}\dot{F} > 1$ C. $\dot{A}\dot{F} < 1$ D. $\dot{A}\dot{F} = -1$

8.4.12 与工作在运算电路中的运放不同, 电压比较器中的运放通常工作在_____。

A. 放大状态 B. 深度负反馈状态
C. 开环或正反馈状态 D. 线性工作状态

8.5 习题 8

8.5.1 振荡电路与放大电路有何异同点。

解：

8.5.2 正弦波振荡器振荡条件是什么？负反馈放大电路产生自激的条件是什么？两者有何不同，为什么？

解：

8.5.3 根据选频网络的不同，正弦波振荡器可分为哪几类？各有何特点？

解：

8.5.4 正弦波信号产生电路一般由几个部分组成，各部分作用是什么？

解：

8.5.5 当需要产生 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ 的正弦波时，应选用什么类型的振荡器。当产生 100MHz 的正弦波时，应选用什么类型的振荡器。当要求产生频率稳定度很高的正弦波时，应选用什么类型的振荡器。

解：

8.5.6 电路如图 8.5.1 所示, 试用相位平衡条件判断哪个电路可能振荡, 哪个不能振荡, 并简述理由。

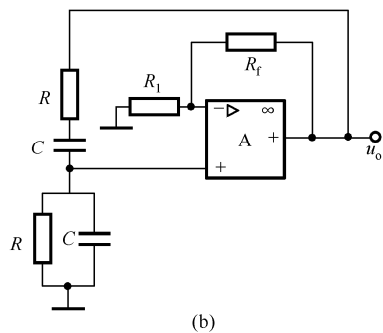
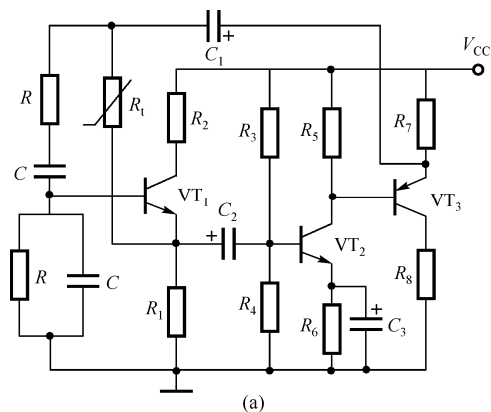


图 8.5.1 习题 8.5.6 电路图

解:

8.5.7 电路如图 8.5.2 所示: (1) 保证电路振荡, 求 R_p 的最小值; (2) 求振荡频率 f_0 的调节范围。

解:

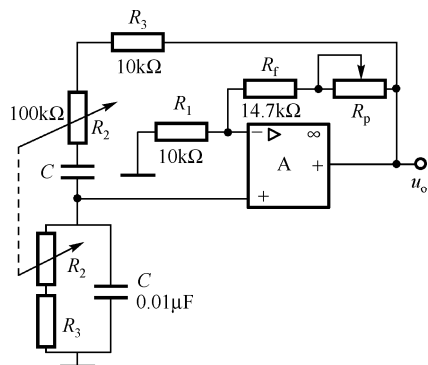


图 8.5.2 习题 8.5.7 电路图

8.5.8 如图 8.5.3 所示各元器件：(1) 请将各元器件正确连接，组成一个 RC 文氏桥正弦波振荡器；(2) 若 R_1 短路，电路将产生什么现象；(3) 若 R_1 断路，电路将产生什么现象；(4) 若 R_f 短路，电路将产生什么现象；(5) 若 R_f 断路，电路将产生什么现象。

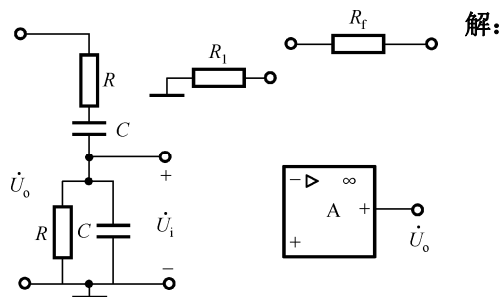


图 8.5.3 习题 8.5.8 电路图

8.5.9 图 8.5.4 所示为正弦波振荡电路，已知 A 为理想运放。

(1) 已知电路能够产生正弦波振荡，为使输出波形频率增大应如何调整电路参数？

(2) 已知 $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ，若产生稳定振荡，则 R_f 约为多少？

(3) 已知 $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ， $R_f = 15\text{k}\Omega$ ，问电路产生什么现象？简述理由。

(4) 若 R_f 为热敏电阻，试问其温度系数是正还是负？

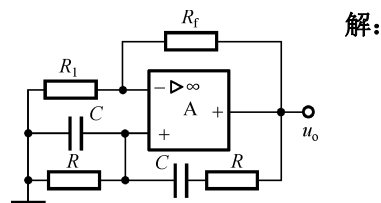


图 8.5.4 习题 8.5.9 电路图

8.5.10 电路如图 8.5.5 所示。试用相位平衡条件判断电路是否能振荡，并简述理由。指出可能振荡的电路属于什么类型。

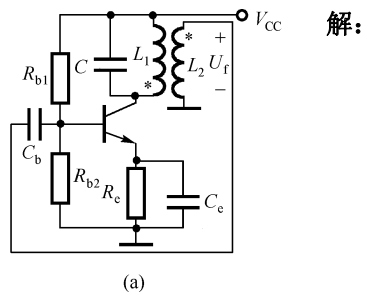


图 8.5.5 习题 8.5.10 电路图

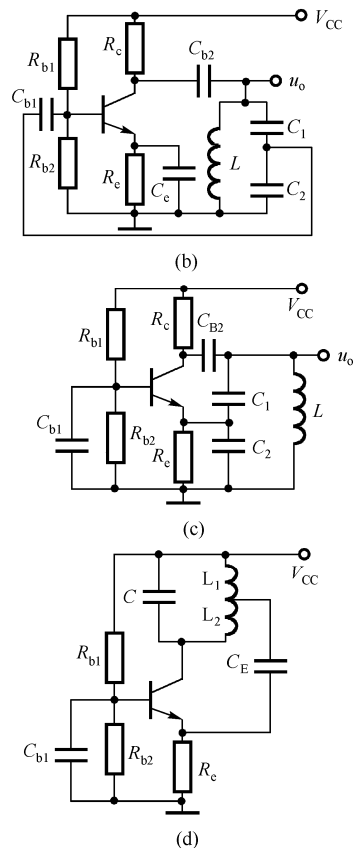


图 8.5.5 习题 8.5.10 电路图 (续)

8.5.11 石英晶体振荡电路如图 8.5.6 所示。试用相位平衡条件判断电路是否能振荡，并说明石英晶体在电路中的作用。

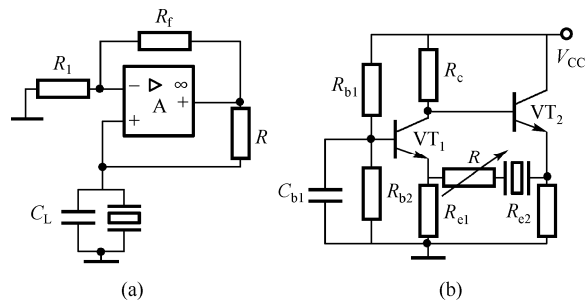


图 8.5.6 习题 8.5.11 电路图

解:

8.5.12 电路如图 8.5.7 所示，运放为理想的，试求出电路的门限电压 U_{TH} ，并画出电压传输特性曲线。

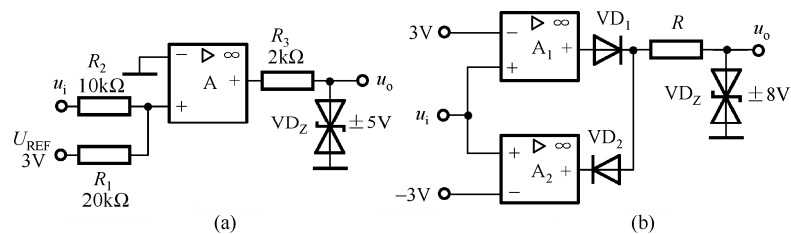


图 8.5.7 习题 8.5.12 电路图

解:

8.5.13 电路如图 8.5.8 所示, 已知运放最大输出电压为 $U_{om} = \pm 12V$, 试求出两电路的门限电压 U_{TH} , 并画出电压传输特性曲线。

解:

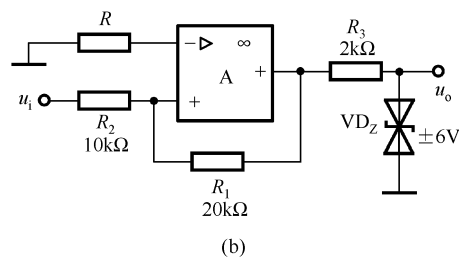
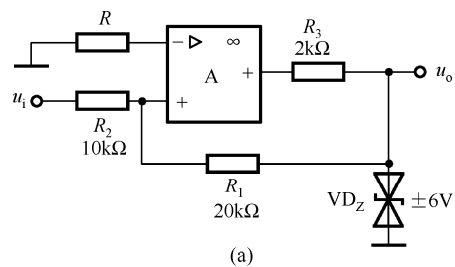


图 8.5.8 习题 8.5.13 电路图

8.5.14 电路如图 8.5.9 所示，运放为理想的，已知运放最大输出电压 $U_{om} = \pm 15V$ ，稳压管的稳定电压为 $U_Z = 6V$ ，且 VD_1 、 VD_2 、 VD_Z 均为理想的，试画出电压传输特性曲线。

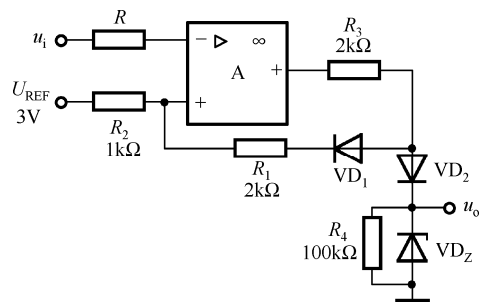
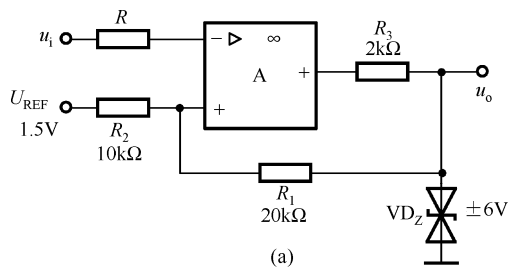


图 8.5.9 习题 8.5.14 电路图

解:

8.5.15 电路如图 8.5.10(a)所示，运放为理想的：(1) 试求电路的门限电压 U_{TH} ，并画出电压传输特性曲线；(2) 输入电压波形如图 8.5.10(b)所示，试画出输出电压 u_o 的波形。



解:

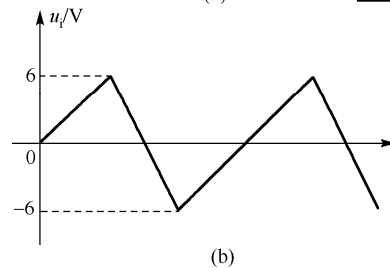


图 8.5.10 习题 8.5.15 电路图

8.5.16 电路如图 8.5.11 所示, 已知运放为理想的, 运放最大输出电压为 $U_{om} = \pm 15V$: (1) A_1 、 A_2 、和 A_3 各组成何种基本电路; (2) 若 $u_i = 5 \sin \omega t (V)$, 试画出与之对应的 u_{o1} 、 u_{o2} 和 u_o 的波形。

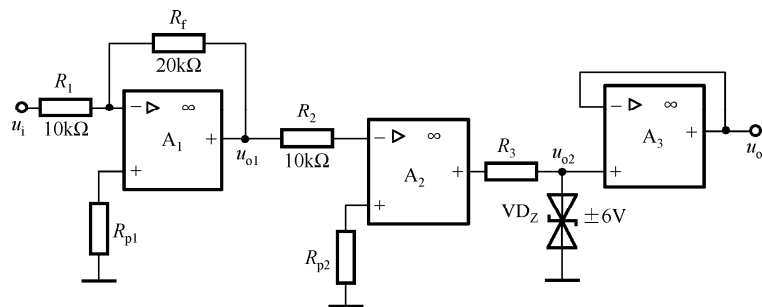


图 8.5.11 习题 8.5.16 电路图

解:

8.5.17 电路如图 8.5.12 所示, 设二极管和运放都是理想的: (1) A_1 、 A_2 各组成什么电路? (2) 求出电路周期 T 的表达式。

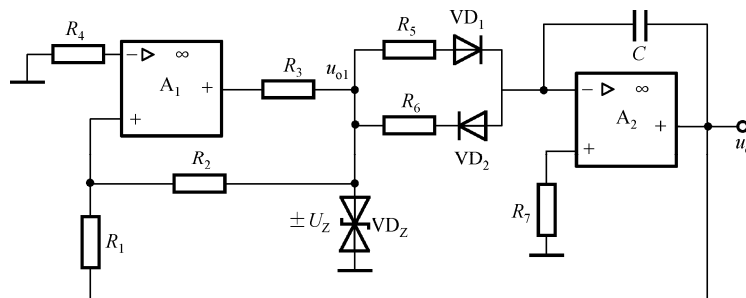


图 8.5.12 习题 8.5.17 电路图

解:

第9章 实 验

9.1 常用电子仪器的使用

一、实验目的

- 1. 了解常用电子仪器的主要技术指标、性能、型号，以及面板上各旋钮和开关的功能作用。
- 2. 初步掌握常用电子仪器的使用方法和一般的测量技术。
- 3. 学会正确使用与本实验有关的仪器。

二、实验仪器

实验所用实验仪器如表 9.1.1 所示，实验仪器的型号和主要功能根据实验测试内容进行填写。

表 9.1.1 实验仪器

序号	仪 器 名 称	型 号	主 要 功 能
1	模拟电路实验箱（台）装置箱		
2	数字万用表		
3	指针式万用表		
4	函数信号发生器		
5	双踪示波器		
6	交流毫伏表		

三、实验原理

1. 概念介绍

（1）分贝

在电子工程领域，4 种放大电路有不同的增益，其中 A_r 为互阻增益，量纲为电阻， A_g 为互导增益，量纲为电导。 A_u 和 A_i 两种无量纲的增益在工程上常用以 10 为底的对数增益表达，其基本单位为贝尔(B)，平时用它的十分之一单位分贝（dB），这样用分贝表示的电压增益和电流增益分别表示为

$$A_u(\text{dB}) = 20\lg|A_u|(\text{dB}) \tag{9.1.1}$$

$$A_i(\text{dB}) = 20\lg|A_i|(\text{dB}) \tag{9.1.2}$$

由于功率与电压（或电流）的平方成比例，因而功率增益表示为

$$A_p(\text{dB}) = 10\lg A_p(\text{dB}) \tag{9.1.3}$$

（2）误差

测量值与真值之差异称为误差，电子工程实验离不开对物理量的测量，测量有直接的，也有间接的。由于仪器、实验条件、环境等因素的限制，测量不可能无限精确，物理量的测量值与客观存在的真实值之间总会存在着一定的差异，这种差异就是测量误差。根据误差产生的原因及性质可分为系统误差与偶然误差两类。

① 系统误差

在相同条件下，多次测量时，误差的大小和方向均保持不变，或在条件变化时，按照某种确定规律变化的误差称为系统误差。产生系统误差的原因有很多种，仪器的误差、测量方法的误差和实验条件等都会造成系统误差。实际中我们应根据具体的实验条件和系统误差的特点，找出产生系统误差的主要原因，采取适当措施降低它的影响。

② 偶然误差

在相同条件下，对同一物理量进行多次测量，由于各种偶然因素，会出现测量值时而偏大，时而偏小的误差现象，这种类型的误差叫做偶然误差。产生偶然误差的原因很多，例如读数误差，实验仪器由于环境温度、湿度、电源电压不稳定、振动等因素的影响而产生微小变化等。这些因素的影响一般是微小的，而且难以确定某个因素产生的具体影响的大小，因此偶然误差难以找出原因加以排除。

为了衡量和计算测量值与真值之间的偏离程度，误差常用以下两种表示方式。

① 绝对误差

测量值 X 与真实值 X_0 之差的绝对值称为绝对误差，它反映测量值偏离真值的大小：

$$\Delta X = |X - X_0| \quad (9.1.4)$$

② 相对误差

绝对误差与真实值 X_0 或多次测量的平均值的比值称为相对误差。常用百分数表示：

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \quad (9.1.5)$$

2. 常用电子仪器

在生产、科研、教学中最常用的电子仪器有万用表、交流毫伏表、函数信号发生器、直流稳压电源、示波器、实验箱（台）、频率计等。万用表主要用于交流电流和电压有效值、直流电流、电压及电阻值的测量。交流毫伏表主要用于交流电压有效值及通频带的测量。函数信号发生器输出的正弦波、三角波、矩形波为连续变化的模拟电信号，可以采用示波器来观察与测量。

3. 正弦波和矩形波的主要电参数

正弦波和矩形波是最常用的电信号，其电压波形如图 9.1.1 所示，正弦波的主要参数可分别用有效值 U 、峰值 U_p 、峰-峰值 U_{p-p} 、周期 T （或频率 f ）表示；矩形波的主要参数有幅值 U_M ，脉冲周期 T （或频率 f ）和脉宽 T_p （或占空比 D ）；方波是矩形波的特例，其占空比为 1:2。

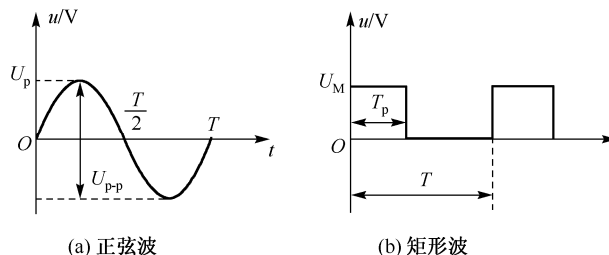


图 9.1.1 正弦波及矩形波

各种电参数之间的关系为

$$U_{p-p} = 2U_p = 2\sqrt{2}U, \quad U_p = \sqrt{2}U, \quad T = 1/f, \quad D = T_p/T$$

示波器主要用于信号的显示和观测。电参数测试线路连接示意图如图 9.1.2 所示。

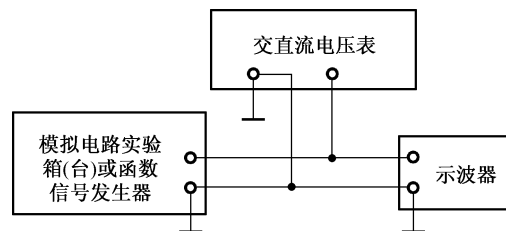


图 9.1.2 电参数测试线路连接示意图

4. 相位测量原理

用双踪示波器测量相位差时的连线示意图如图 9.1.3 所示, 调节函数信号发生器使其输出频率为 2kHz、峰-峰值为 4V 的正弦波, 经 RC 移相网络获得两路同频率、同幅度而不同相位的正弦波, 分别送到双踪示波器的 CH1 和 CH2 两个通道的信号输入端, 显示方式置于“交替 (ALT)”或“断续 (CHOP)”挡位。然后, 分别调节 CH1 和 CH2 位移旋钮和“V/DIV”开关以及相关的微调旋钮, 使其显示出如图 9.1.4 所示的双踪示波器测量相位的波形。为了便于稳定波形, 应将同步信号选择键拨到“CH2”位置, 以便比较两信号的相位。

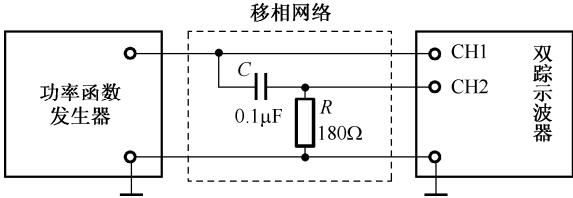


图 9.1.3 双踪示波器测量相位差时的连线示意图

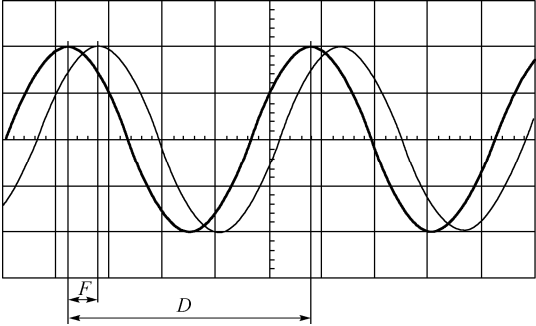


图 9.1.4 双踪示波器测量相位的波形

由图 9.1.4 可知正弦波一个周期在 X 轴向所占的格数为 D , 则每格的相位为 $360^\circ/D$, 两个波形在 X 轴方向的差距为 F 格, 则两波形之间的相位差为 $\varphi = \frac{360^\circ}{D} \times F$ 。

四、实验内容及步骤

1. 直流电压的选择与调节以及测量

根据模拟电路实验箱 (台) 输出的直流稳压电压值, 分别用数字万用表和指针式万用表的合适量程测量出各组电压值, 并记录于表 9.1.2 中。

表 9.1.2 直流电压的选择与调节以及测量记录表

序号	模拟电路实验箱 (台) 输出的电压值 (V)	数字万用表			指针式万用表		
		量程 (V)	测量值 (V)	相对误差 δ	量程 (V)	测量值 (V)	相对误差 δ
1							
2							
3							
4							
5							
6							

2. 交流信号的选择与调节以及测量

(1) 示波器自身校准信号的观察与测画

调节和选择所用示波器的相关旋钮和开关, 使其处于合适的位置, 即各灵敏度微调旋钮一般都应置于校准位置, 接入示波器自身的校准信号, 调节 Y 轴和 X 轴的位移旋钮和亮度旋钮等, 即可在示波器显示屏上显示出相应的方波, 在图 9.1.5 上测画出其波形, 并标注幅值 U_M 和周期 T 。

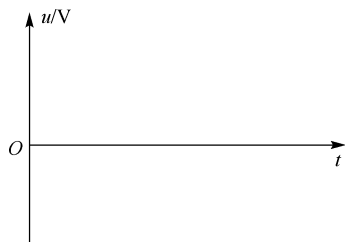


图 9.1.5 测画示波器校准信号的坐标

(2) 信号波形的选择与观察

调节函数信号发生器,使其输出频率为 1kHz 左右,峰-峰值为 5V 左右,波形分别为正弦波、方波、三角波以及脉冲波,由示波器分别进行显示观察,并画出波形示意图于表 9.1.3 中。

表 9.1.3 信号发生器输出的波形图

	函数信号发生器输出的波形			
	正弦波	三角波	方波	脉冲波
示波器所显示的波形图				

(3) 波形幅度的调节与测量

调节函数信号发生器,使其输出频率为 1kHz 的正弦波。按表 9.1.4 的要求,使其电压输出端输出相应的电压,并用示波器、交流毫伏表及数字万用表,分别测量其电压值,记录于表 9.1.4 中。

(4) 波形频率的调节和测量

将函数信号发生器输出的正弦波电压峰-峰值调到 5V,按表 9.1.5 中的要求调到所需的频率,再分别选择合适的 T/DIV 位置,测量出相应的频率,记录于表 9.1.5 中。

表 9.1.4 正弦波电压调节与测量记录表

信号发生器 输出正弦波 电压 $f = 1\text{kHz}$	示波器			交流毫伏表		数字万用表	
	V/DIV 应选 挡位	波形所 占 Y 轴 格数	U_p 测量值	应选 量程	所测 电压的 有效值	应选 量程	所测 电压的 有效值
0dB $U_{p-p} = 8\text{V}$							
-20dB $U_{p-p} = 0.8\text{V}$							
-40dB $U_{p-p} = 80\text{mV}$							
*0dB $U_{p-p} = 2\text{V}$							

表 9.1.5 正弦波频率调节与测量记录表

函数信号发生器 输出正弦波 $U_{p-p} = 5\text{V}$	示波器				
	T/DIV 位置	周期所占 格数	所测 周期	所测 频率	相对 误差
1MHz					
50kHz					
1kHz					
20Hz					

五、注意事项

1. 在测量电压之前,应先分清楚是交流电压还是直流电压,然后选择相对应的电压测量挡位。
2. 切忌使用万用表的电阻挡或电流挡去测量交、直流电压,否则易烧坏万用表。
3. 应正确合理地选择电压表的量程,以提高测量精度。在不知其电压值大小时,应先用大量程测试,然后再往下调,直到量程合适为止。
4. 用示波器测量电压幅度和波形的周期时,Y 轴和 X 轴的灵敏度微调旋钮必须置于校准位置才能使测量结果正确。

六、预习要求

- 1. 实验前必须认真预习、阅读所用电子仪器的使用说明，初步了解其技术指标、测量功能和使用方法。
- 2. 应根据被测量的内容和要求（如交、直流电压和电流，测量精度高低，测量条件，交流信号的波形及频率高低等），正确选用测量仪器。

七、思考题

- 1. 什么是电压有效值？什么是电压峰值？
- 2. 用交流电压表测量的电压值和用示波器直接测量的电压值有什么不同？
- 3. 在用示波器测量交流信号的峰值和频率时，如何操作其关键性的旋钮才能尽可能提高测量精度？

八、实验报告要求

- 1. 明确实验目的。
- 2. 列表指明所用仪器的名称、型号和功能作用。
- 3. 列表整理各项实验内容，并计算出相应的测量结果（须注明单位），画出所测波形。
- 4. 分析计算实验测量值与实际标称值之间的相对误差。
- 5. 解答思考题。
- 6. 写出实验心得体会及其他。

9.2 集成运算放大器的线性应用

一、实验目的

- 1. 学会正确使用集成运算放大器。

- 2. 掌握集成运算放大电路的设计和调试方法。
- 3. 了解集成运算放大器在实际使用时应该注意的一些问题。

二、实验仪器及元器件

根据本实验所用到的仪器及元器件，将实验仪器及元器件的名称、型号、主要功能填写在表 9.2.1 中。

表 9.2.1 实验仪器及元器件

序号	仪器及与元器件名称	型 号	主 要 功 能
1			
2			
3			
4			
5			
6			

三、实验原理

集成运算放大器是高增益的多级直接耦合放大器。集成运放有 1 个反相输入端和 1 个同相输入端，当集成运放工作在线性区时，其参数很接近理想值，实际应用时通常把它当做理想运放来分析。此时，它满足“虚断”（即输入电流 $I_+ = I_- = 0$ ）和“虚短”（即输入电压 $U_+ = U_-$ ）特性。

集成运放按指标可分为通用型、高速型、低功耗型、大功率型、高精度型。其封装形式最常用的是双列直插式，其中，8 脚的 $\mu A741$ 或 F007 的引脚图如图 9.2.1 所示。不同型号的运放各脚号的功能可能有所不同，可查阅有关手册。

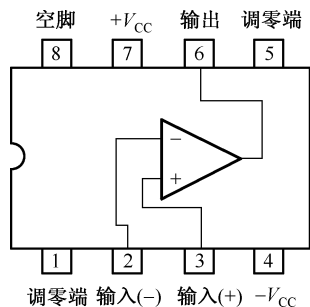


图 9.2.1 集成运放 F007/μA741 的脚号位置图

1. 反相比例运算电路

反相比例运算电路如图 9.2.2 所示，信号由反相端输入，输出信号 U_o 与输入信号 U_i 相位相反， U_o 经 R_F 反馈到反相输入端，构成电压并联负反馈电路。图 9.2.2 中虚线加框部分是由电阻 R 和电位器 R_{p1} 构成的分压电路，为反相比例运算电路提供输入信号 U_i 。

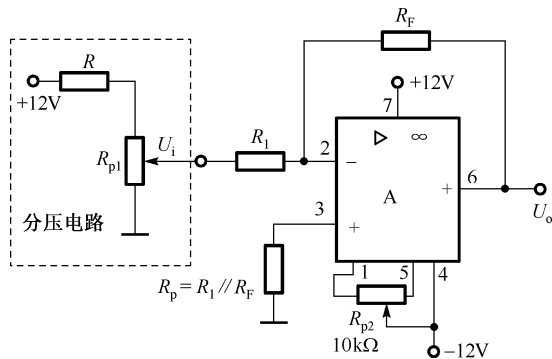


图 9.2.2 反相比例运算电路

根据“虚断”、“虚短”概念可知，该电路的闭环电压放大倍数为

$$A_{uF} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

其值为负值，说明输入与输出电压反相。此式还说明在一定条件下，运放的输出电压与输入电压的大小关系是由反馈电阻 R_F 与电阻 R_1 的比值决定的，与电路中的其他参数无关。

若输入信号为正弦交流电压时，其输入信号最大不失真电压的峰-峰值为

$$U_{ipp} = \frac{U_{opp}}{|A_{uF}|} = \frac{U_{opp} R_1}{R_F} = \frac{2U_{oM} R_1}{R_F}$$

通常， U_{oM} 比电源电压 V_{CC} 小 $1 \sim 2V$ 。

由于反相输入端具有“虚地”的特点，故其共模输入电压为零。当 $R_F = R_1$ 时，运算电路的输出电压等于输入电压的负值，故称为反相器。

2. 同相比例运算电路

同相比例运算电路如图 9.2.3 所示，输入信号 U_i 接同相输入端，输出信号 U_o 经 R_F 反馈到反相输入端，使整个电路形成电压串联负反馈。图 9.2.3 中虚线加框部分是由电阻 R 和电位器 R_{p1} 构成的分压电路，为同相比例运算电路提供输入信号 U_i 。

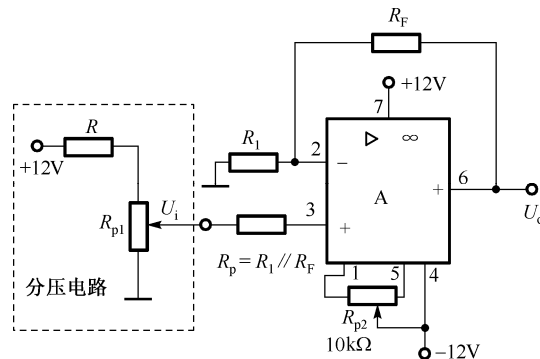


图 9.2.3 同相比例运算电路

当把运放看成是理想运放，且工作在线性区时，有

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \text{ 或 } U_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_i \quad (9.2.1)$$

式 (9.2.1) 说明输出电压与输入电压成比例, 且同相位, 同时也说明同相比例运算电路的闭环电压增益仅与反馈电阻 R_F 及比例电阻 R_1 有关。当图 9.2.3 中的 $R_F = 0$ 或者 $R_1 = \infty$ 时, $A_{uf} = 1$, 说明输出电压 U_o 与输入电压 U_i 大小相等、相位相同, 称为同相电压跟随器, 常用于放大器中的阻抗变换。

3. 反相求和运算电路

反相求和运算电路如图 9.2.4 所示, 此电路是在反相比例运算电路的基础上增加了几条输入支路, 便构成反相求和运算电路, 也称为反相加法运算电路。

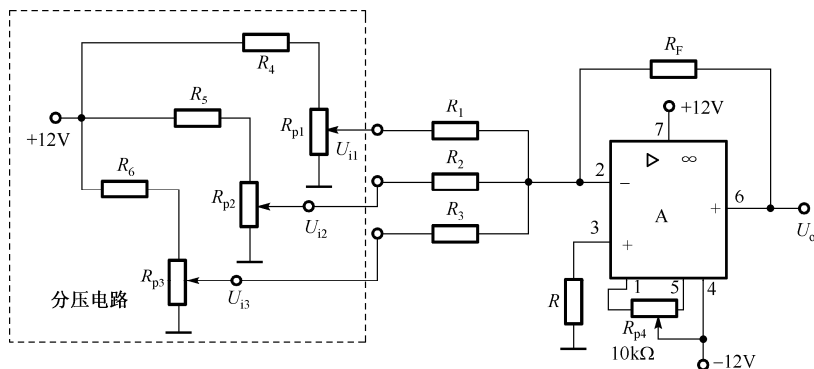


图 9.2.4 反相求和运算电路

在理想的条件下, 运放的反相输入端为“虚地”, 三路输入电压彼此隔离, 各自独立地经比例电阻转换成电流, 进行代数和运算, 电路的输出电压为

$$U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} U_{i2} + \frac{R_F}{R_3} U_{i3}\right)$$

$$\text{当 } U_{i1} = U_{i2} = U_{i3} = U_i \text{ 时, } U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} + \frac{R_F}{R_2} + \frac{R_F}{R_3}\right) U_i$$

$$\text{当 } R_1 = R_2 = R_3 = R_F \text{ 时, } U_o = -(U_{i1} + U_{i2} + U_{i3})$$

电路中为了减少失调的影响, 应取 $R = R_1 // R_2 // R_3 // R_F$ 。

4. 减法运算电路

减法运算电路如图 9.2.5 所示, 当 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_F$ 时, 由叠加原理可求得其输出电压为

$$U_o = (U_{i2} - U_{i1}) \frac{R_F}{R_1} \quad (9.2.2)$$

式 (9.2.2) 说明该电路实现了减法比例运算。

当图 9.2.5 中 $R_1 = R_2 = R_3 = R_F$ 时, 则有

$$U_o = U_{i2} - U_{i1}$$

从而实现了减法运算。减法运算电路常用于将差分输入转换成单端输出的情况, 广泛地用来放大具有强烈共模干扰的微弱信号。另外需要指出, 要实现精确的减法运算, 必须严格选取电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_F , 并进行调零。

5. 积分运算电路

将反相比例电路中的反馈电阻 R_F 换成电容 C_f , 就组成了反相积分电路, 如图 9.2.6 所示。假设电容 C_f 上的初始电压为零 (即 $t=0$ 时刻电容 C 两端的电压值 $u_c(0)=0$), 则

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C_f} \int u_i(t) dt$$

如果 $u_i(t)$ 是幅值为 U 的阶跃电压, 并设 $u_c(0)=0V$, 则

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C_f} \int_0^t U dt = -\frac{U}{R_1 C_f} t$$

即输出电压 $u_o(t)$ 随时间增长而线性下降。显然, $R_1 C_f$ 的数值越大, 达

到给定的 u_o 值所需的时间就越长。积分电路输出电压 u_o 所能达到的最大值受集成运放最大输出范围的限制。

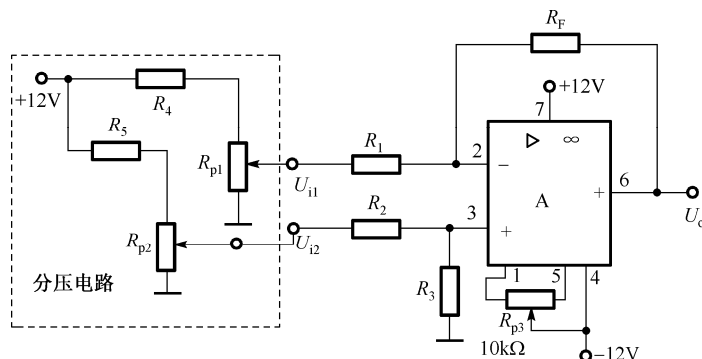


图 9.2.5 减法运算电路

如果 $u_i(t)$ 是幅值为 U_m 的方波，则积分电路输出电压的波形如图 9.2.7 所示。

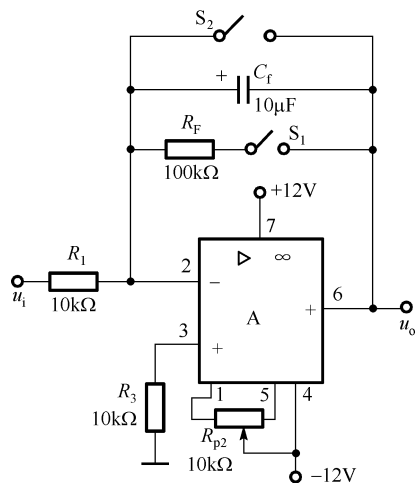


图 9.2.6 积分运算电路

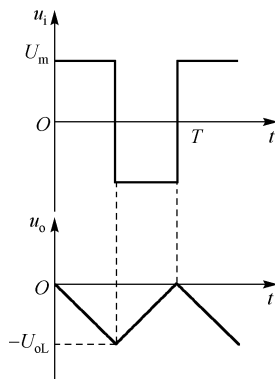


图 9.2.7 方波信号输入及积分输出波形

四、实验电路参数设计

分别用集成运放等器件组成一个反相比例运算电路、同相比例运算电路、反相求和运算电路和减法运算电路，其输出电压 U_o 与输入电压 U_i 的关系分别对应满足

$$U_o = -10U_i$$

$$U_o = 11U_i$$

$$U_o = -(20U_{i1} + 10U_{i2} + 5U_{i3})$$

$$U_o = 10(U_{i2} - U_{i1})$$

集成运放的工作电源为 $\pm 12V$ 。要求选用集成运放的型号，设计各电阻的阻值，并根据实验室现有的电阻选取确定，并完整正确地画出以上 5 种实验电路（包括每种电路中的调零电位器，尤其是各种电路中运放的脚号等）。

五、实验内容

1. 反相比例运算电路

正确组装连接如图 9.2.2 所示的实验电路，对电路进行调零，使 $U_i = 0$ （即将 U_i 端接地），调节调零电位器，使 $U'_o = 0$ ，或记下 U'_o 的值，并验证相位及比例关系： $A_{uf} = U_o/U_i$ （取 $U_i = 0.4V$ ）或 $A_{uf} = (U_o - U'_o)/U_i$ ，将测量数据记录于表 9.2.2 中。

2. 同相比例运算电路

正确组装连接如图 9.2.3 所示实验电路，对电路进行调零，使 $U_i = 0$ （即将 U_i 端接地），调节调零电位器，使 $U'_o = 0$ ，或记下 U'_o 的值，并验证相位及比例关系： $A_{uf} = U_o/U_i$ （取 $U_i = 0.4V$ ）或 $A_{uf} = (U_o - U'_o)/U_i$ ，将测量数据记录于表 9.2.2 中。

3. 反相求和运算电路

正确组装连接如图 9.2.4 所示的实验电路, 对电路进行调零, 使 $U_{i1}=U_{i2}=U_{i3}=0$ (即将 U_{i1} 、 U_{i2} 和 U_{i3} 端均接地), 调节调零电位器, 使 $U'_o=0$, 或记下 U'_o 的值, 并验证反相求和关系: $U_o=-(20U_{i1}+10U_{i2}+5U_{i3})$ (取 $U_{i1}=0.2\text{V}$, $U_{i2}=0.3\text{V}$, $U_{i3}=0.4\text{V}$) 或者 $U_o=-(20U_{i1}+10U_{i2}+5U_{i3})-U'_o$, 将测量数据记录于表 9.2.2 中。

4. 减法运算电路

正确组装连接如图 9.2.5 所示的实验电路, 对电路进行调零, 使 $U_{i1}=U_{i2}=0$ (即将 U_{i1} 和 U_{i2} 端均接地), 调节调零电位器, 使 $U'_o=0$, 或记下 U'_o 的值, 并验证减法运算关系: $U_o=10(U_{i2}-U_{i1})$ (取 $U_{i2}=1.0\text{V}$, $U_{i1}=0.5\text{V}$) 或者 $U_o=10(U_{i2}-U_{i1})-U'_o$, 将测量数据记录于表 9.2.2 中。

表 9.2.2 实验数据记录表

测量电路	输入电压		输出电压				输出电压 相对 误差
	理论值	实测值	调零 电压 U'_o	实测值 U_o	修正值 U_o	理论值	
反相比例运算电路	$U_i=0.4\text{V}$						
同相比例运算电路	$U_i=0.4\text{V}$						
反相求和运算电路	$U_{i1}=0.2\text{V}$						
	$U_{i2}=0.3\text{V}$						
	$U_{i3}=0.4\text{V}$						
减法运算电路	$U_{i1}=0.5\text{V}$						
	$U_{i2}=1.0\text{V}$						

5. 积分运算电路

正确组装连接如图 9.2.6 所示的实验电路, 在进行积分运算之前,

首先应对运放调零。为了便于调节, 将 S_1 闭合, 即通过电阻 R_F 的负反馈作用帮助实现调零。但在完成调零后, 应将 S_1 打开, 以免因 R_F 的接入造成积分误差。 S_2 的设置一方面为积分电容放电提供通路, 同时可实现积分电容初始电压 $u_c(0)=0\text{V}$ 。另一方面, 可控制积分起始点, 即在加入信号 u_i 后, 只要 S_2 一打开, 电容就被恒流充电, 电路就开始进行积分运算。

打开 S_2 , 闭合 S_1 , 对运放输出 u_o 进行调零。调零完成后, 再打开 S_1 , 闭合 S_2 , 使 $u_c(0)=0\text{V}$ 。

预先调好直流输入电压 $U_i=0.5\text{V}$, 接入实验电路, 再打开 S_2 , 然后用直流电压表测输出电压 U_o , 每隔 5s 读一次 U_o , 将测量结果记入表 9.2.3 中, 直到 U_o 的绝对值不再继续明显增大为止。

表 9.2.3 积分运算电路实验数据记录表

t/s								
U_o/V								

输入频率为 1kHz, 幅值为 500mV 的方波, 观察并测画出输出波形, 标出其幅值及周期于图 9.2.8 中。

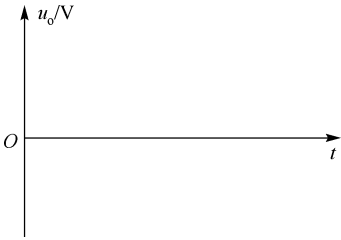


图 9.2.8 积分运算电路输出波形测画

六、注意事项

1. 集成运放的电源电压值必须正确, 在接线之前必须调节和验

证其值是否正确，断开电源开关之后才能进行接线。接线必须正确无误，特别要注意电源的正负极切忌反接。

2. 运放的输出端绝不允许对地短路，所以输出端千万不要引出一端悬空的测试线，以防短路而损坏运放。

3. 集成运放用于交流信号放大时，可能产生自激振荡现象，使运放无法正常工作，所以需在相应的运放引脚端接上相位补偿网络进行消振。

七、预习要求

- 1. 预习、理解实验原理。
- 2. 完成电路参数设计，画出完整正确的实验电路。
- 3. 领会和明确实验内容，完成预习报告的写作。

八、思考题

- 1. 理想运放具有哪些最主要的特点？
- 2. 集成运放用于直流信号放大时，为何要进行调零？
- 3. 集成运放用于交流信号放大时需要进行调零吗，为什么？

9.3 二极管极性的判别及直流稳压电源

一、实验目的

- 1. 学会用指针式万用表简易判别二极管的电极和性能优劣的方法。
- 2. 了解单相整流、滤波和稳压电路的工作原理。
- 3. 学会直流稳压电源电路的设计与调测方法。
- 4. 掌握集成稳压器的特点，会合理选择和使用。

二、实验仪器及元器件


根据本实验所用到的仪器及元器件，将实验仪器及元器件的名称、型号、主要功能填写于表 9.3.1 中。

表 9.3.1 实验仪器及元器件

序号	仪器及元器件名称	型 号	主 要 功 能
1			
2			
3			
4			
5			
6			

三、实验原理

1. 二极管极性及其性能判别

晶体二极管是具有单向导电性的半导体两极器件。它由一个 PN 结加上相应的引线和管壳组成，用符号 “” 表示。本符号表示左边为正极，接 P 型半导体；右边为负极，接 N 型半导体。根据二极管制造时所用的材料不同可分为硅管和锗管两种：硅管的正向压降一般为 0.6~0.7V，锗管的正向压降则一般为 0.2~0.3V。

用指针式万用表判别二极管的极性，其测量原理主要根据万用表的内部结构和 PN 结的单向导电性进行。如果二极管性能正常，电阻值小时，黑表笔所接的电极（引脚）为二极管的正极，另一个电极（引脚）为负极（数字万用表判断的结果与指针式万用表判断的结果相反，电阻值小时，红表笔所接为正极，黑表笔接的是负极）。

选择合适的量程（如 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ ）判别二极管的极性，红表笔接二极管的负极，黑表笔接二极管的正极，此时所测的是二极管正向电阻，阻值较小；红黑表笔反接后（且将量程改为 $R \times 10k\Omega$ 挡）所测的是二极管反向电阻，阻值很大，性能优；如果所测得的正反向电阻的阻值均为无穷大，表明该二极管内部断路；如果所测得的正反向电阻的阻值均为零或很小，则表明该二极管内部短路；如果所测得的正反向电阻的阻值接近，表明该二极管性能严重恶化。

2. 直流稳压电源的组成

在电子电路及设备中，一般都需要稳定的直流电源供电。由于交流电便于输送和分配，因此在许多场合和设备中需要直流电时，通常是通过直流稳压电源将交流电变换成稳定的直流电。

直流稳压电源一般由 4 个部分组成，如图 9.3.1 所示。

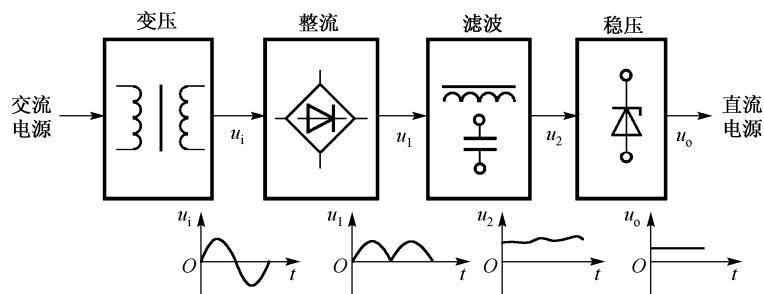


图 9.3.1 直流稳压电源的基本框图

电源变压器将电网电压（220V 或 380V，50Hz）变换为整流电路所需要的交流电压。整流电路将变压器的次级交流电转换为单向脉动的直流电。滤波电路将整流后的纹波滤除，将脉动的直流电变换为平滑的直流电。经整流滤波后的直流电仍不稳定，随电网电压的波动或负载的变化而变化，所以必须加稳压电路来克服这种变化，以便得到一个纹波小、不随电网电压和负载变化的稳定的直流电源。

本次实验采用桥式整流、电容滤波的形式，电路的输出电压为 $U_{I(AV)} = (0.9 \sim \sqrt{2})U_2$ ，其系数大小主要由负载电流大小来决定。负载电阻很小时， $U_{I(AV)} = 0.9U_2$ ；负载电阻开路时， $U_{I(AV)} = \sqrt{2}U_2$ ，工程上常取 $U_{I(AV)} = 1.2U_2$ 。滤波电容满足 $C \geq (3 \sim 5)T / 2R_L$ （ $T = 0.02s$ ）时，才有较好的滤波效果。

稳压电路采用集成稳压器进行稳压。

3. 三端集成稳压器

集成稳压器的种类很多，目前使用的大多是三端式集成稳压器。常用的有以下 4 个系列：固定正电压输出的集成稳压器 78xx 系列、固定负电压输出的集成稳压器 79xx 系列、可调的正电压输出的集成稳压器 117/217/317 系列、可调的负电压输出的集成稳压器 137/237/337 系列。其 TO-220 封装的集成稳压器引脚位置和功能如图 9.3.2 所示。

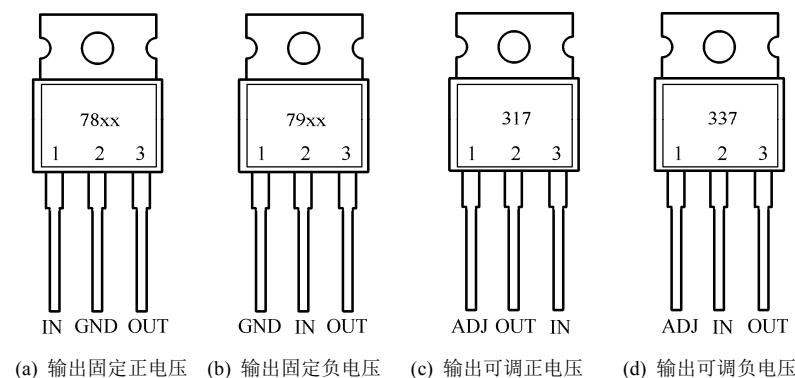


图 9.3.2 集成稳压器引脚位置和功能图

几种典型的集成稳压器的主要技术指标如表 9.3.2 所示。

表 9.3.2 典型集成稳压器的主要技术指标

参数名称 /单位	型号	CW7805	CW7812	CW7912	CW317
输入电压/V		+10	+19	-19	≤ 40
输出电压范围/V		+4.75 ~ +5.25	+11.4 ~ +12.6	-11.4 ~ -12.6	+1.2 ~ +37
最小输入电压/V		+7	+14	-14	$+3 \leq U_i - U_o \leq +40$
电压调整率/mV		+3	+3	+3	0.02%
最大输出电流/A		加散热片可达 1A			1.5

四、实验内容及步骤

1. 二极管的极性和性能的判断

用指针式万用表的欧姆挡 $R \times 100\Omega$ 、 $R \times 1k\Omega$ 分别测量硅和锗两种材料的二极管的正向电阻值，用 $R \times 10k\Omega$ 挡测量其反向电阻值，分别记录测量结果于表 9.3.3 中。性能判别分好（优）、一般、差（坏）3 种。并在“对应的符号极性”实物示意图栏目中画出二极管对应的极性符号图。

表 9.3.3 二极管的极性和性能测试

所测二极管 型号		正向电阻值		反向电阻值	对应的 符号极性	性能
		$R \times 100\Omega$	$R \times 1k\Omega$	$R \times 10k\Omega$		
硅管					—  —	
锗管					—  —	

2. 固定正电压输出的直流稳压电源实验电路

（1）正确设计和组装由 CW7812 组成的直流稳压电源电路，如图 9.3.3 所示。

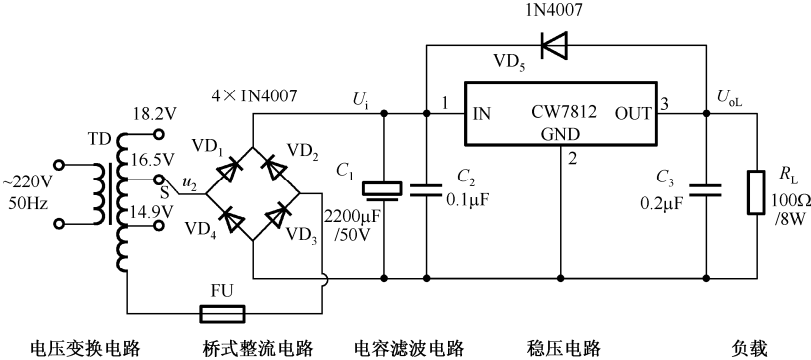


图 9.3.3 由 CW7812 组成的直流稳压电源电路

该电路中 C_1 为低频滤波电容，其值较大，通常取几百到几千 μF ，且应采用不低于 $2U_2$ 耐压的电容； C_2 、 C_3 为高频滤波电容，其值较小，通常取零点几 μF 即可。该电路中的 R_L 为负载电阻，必须使用大功率的电阻（8W），阻值可取 100Ω 左右。按此选取的一组参数如图 9.3.3 所示，供参考。

（2）调节变压器 TD 的位置，使 U_2 为所设计的值，即满足 $U_{I(AV)} = 1.2U_2 = 19V$ （CW7812 典型输入电压为 19V，参见表 9.3.2），测量如表 9.3.4 所示的参数。

表 9.3.4 直流电源电路电压参数测试

电路名称	测量值							计算值				
	交流电压 (V)	直流				纹波电压 (mV)		R_o	S_i	γ_i	γ_o	S_{rip}
		电压 (V)			电流 (mA)							
		U_2	U_i	U_{oL}	U_o	I_{oL}	$U_{i\sim}$	$U_{oL\sim}$				
7812												
317												

(3) 分别测量集成稳压器输出端空载和带载时的电压值 U_o 和 U_{oL} ，以及流过负载电阻的电流 I_{oL} ，计算输出电阻 R_o 的阻值

$$R_o = \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} = \frac{U_o - U_{oL}}{I_{oL}}$$

(4) 电压调整率 S_I 的计算: $S_I = \frac{U_o - U_{oL}}{U_o} \Big|_{\substack{\Delta U_i = 0 \\ \Delta T = 0}} \times 100\%$

(5) 根据以上的测量结果，计算输入纹波系数 γ_i 、输出纹波系数 γ_o 以及纹波抑制比 S_{nlp}

$$\gamma_i = \frac{U_{i\sim}}{U_i}, \quad \gamma_o = \frac{U_{o\sim}}{U_{oL}}, \quad S_{nlp} = 20 \lg \frac{U_{i\sim}}{U_{o\sim}}$$

(6) 调节变压器，使 U_2 增加 10%，模拟电网电压为 220V+22V 的情形，测量此时集成稳压器对应的输出电压 U'_{oL} 和输入电压 U'_i ；调节变压器，使 U_2 减小 10%，模拟电网电压为 220V-22V 的情形，测量此时集成稳压器对应的输出电压 U''_{oL} 和输入电压 U''_i ，将测量值记录于表 9.3.5 中，计算稳压系数为

$$S_U = \frac{(U'_{oL} - U''_{oL}) / U_{oL}}{(U'_i - U''_i) / U_i} \Big|_{\substack{\Delta U_o = 0 \\ \Delta T = 0}} \times 100\%$$

表 9.3.5 稳压性能测试

电路名称	测量值						计算值
	交流电压(V)		直流电压(V)				稳压系数
	U'_2	U''_2	U'_i	U''_i	U'_{oL}	U''_{oL}	
7812							
317							

3. 正电压输出可调的直流稳压电源实验电路

(1) 正确设计和组装由 CW317 组成的直流稳压电源电路，如图 9.3.4 所示。

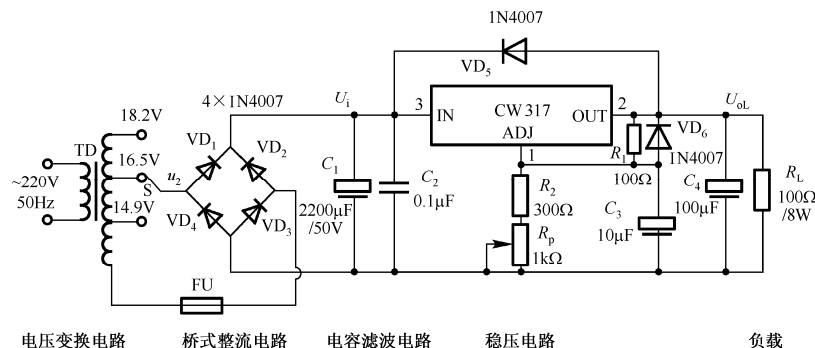


图 9.3.4 由 CW317 组成的直流稳压电源电路

(2) 此电路中滤波电容 C_1 、 C_2 和负载电阻 R_L 的要求同 7812 电路， C_3 、 C_4 采用 10~100μF 电容即可， R_1 、 R_2 可采用 100~300Ω 电阻， R_p 可采用 1kΩ 左右电位器。按此选取的一组参数如图 9.3.4 所示，供参考。

(3) 调节电位器 R_p ，用万用表测量直流稳压电源输出电压最大值 U_{oLmax} 和最小值 U_{oLmin} 。

(4) 调节电位器 R_p ，使输出电压 $U_{oLmin} \leq U_{oL} \leq U_{oLmax}$ ，测量如表 9.3.4 所示参数并计算相应的指标填入表中。

(5) 调节变压器 TD，更改 u_2 值模拟电网波动，测量如表 9.3.5 所示参数并计算稳压系数填入表中。

五、预习要求

1. 预习二极管的特性及其工作原理。
2. 预习直流稳压电源电路的组成及工作原理。
3. 完成实验电路参数设计，画出正确、完整的实验电路。
4. 理解、领会和明确实验内容，写出待测试参数的代号和公式等。

六、注意事项

- 1. 不能用指针式万用表的小量程挡（如 $R \times 1\Omega$ 和 $R \times 10\Omega$ ）及最大量程（ $R \times 10k\Omega$ ）测量工作极限电流小的二极管（尤其是锗管）的正向电阻值。
- 2. 用指针式万用表判断二极管的性能和极性时，在选好量程后，应进行调零和简单必要的校对，方可进行测试，不致造成误测误判。
- 3. 直流稳压电源电路实验输入电压为 220V 的单相交流强电，实验时必须时刻注意人身和设备安全，千万不可大意，必须严格按照接线、拆线时不带电，测量、调试和进行故障排除时人体绝不能触碰带强电的导体。
- 4. 接线时必须十分认真、仔细、反复检查、确认组装和连接正确无误后才能通电测试。
- 5. 变压器的输出端、整流电路和稳压器的输出端都绝不允许短路，以免烧坏元器件。
- 6. 千万不可用万用表的电流挡和欧姆挡测量电压，当某项内容测试完毕后，都必须将万用表置于交流电压最大量程。
- 7. 实验完成之后，必须在关掉电源之后才能拆除接线。
- 8. 电解电容有正负极性之分，不可接错，否则将烧坏电容。
- 9. 负载电阻 R_L 必须用大功率电阻（8W），绝不能用小功率电阻，否则将烧坏负载电阻。

七、思考题

- 1. 为什么不能用指针式万用表的 $R \times 1\Omega$ 挡和 $R \times 10\Omega$ 挡量程测量工作极限电流小的二极管的正向电阻值？
- 2. 用指针式万用表的不同量程测量同一只二极管的正向电阻值，其结果不同，为什么？

- 3. 桥式整流电容滤波电路的输出电压 $U_{I(AV)}$ 是否随负载的变化而变化？为什么？
- 4. 在测量 U_{oL} 时，是否可以用指针式万用表进行测量？为什么？
- 5. 图 9.3.3 所示电路中的 C_2 和 C_3 起什么作用？如果不用 C_2 和 C_3 将可能出现什么现象？

9.4 三极管管型的判别及共发射极放大电路

一、实验目的

- 1. 学会用指针式万用表简易判别三极管的极性和类型的方法。
- 2. 掌握放大器静态工作点的调试方法，了解电路中各元器件参数对静态工作点的影响。
- 3. 掌握放大器的主要性能指标的调测方法。
- 4. 掌握发射极负反馈电阻对放大电路性能的影响。

二、实验仪器及元器件

根据本实验所用到的仪器及元器件，将实验仪器及元器件的名称、型号、主要功能填写于表 9.4.1 中。

表 9.4.1 实验仪器及元器件

序号	仪器及元器件名称	型 号	主 要 功 能
1			
2			
3			
4			
5			
6			

三、实验原理

1. 三极管的极性 & 类型判别

用指针式万用表判别三极管的极性,其测量原理主要是根据万用表的内部结构和 PN 结的单向导电性进行的。NPN 型和 PNP 型晶体三极管的等效结构如图 9.4.1 所示。

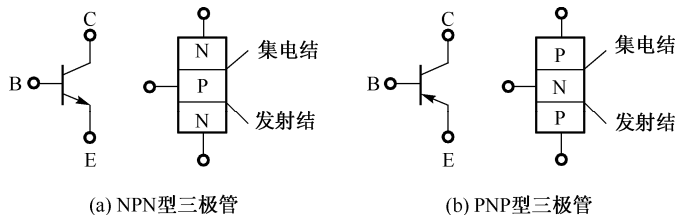


图 9.4.1 晶体三极管的结构

根据晶体管的结构,可用万用表判别晶体管的类型(NPN 型或 PNP 型)和 3 个电极等。其判别原理和方法如下。

(1) “两大两小”判断类型,确定基极 B。

将万用表的功能选为“ Ω ”,量程拨到 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡,若把黑表笔接到某一假设为基极的引脚上,红表笔分别接到其余两只引脚上,如果两次测得的电阻值都很大(或者都较小),然后把红表笔接到假设的基极引脚,黑表笔分别接到其余两只引脚,两次所测得电阻值都较小(或者都很大),则可确定所假设的基极是正确的,即简称为“两大两小”或者“两小两大”。如果两次测得的电阻值为一大一小,则可确定假设错了,这时就需要重新假设一引脚为基极,再重复上述测试直到找到基极。基极确定的同时也可判定三极管的类型:如果是黑表笔接基极,红表笔分别接其他两极时所测的电阻值都较小,则说明该晶体三极管为 NPN 型,反之则为 PNP 型。

(2) 构建放大状态,确定集电极 C 和发射极 E。

此项判断须在完成前项判别确定了三极管类型和基极的基础上进行。现以 NPN 型三极管为例进行判断。判断测试的 4 种等效电路图分别如图 9.4.2 所示。

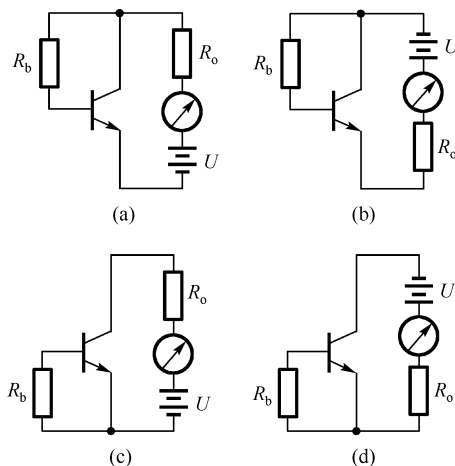


图 9.4.2 判断三极管集电极 C 和发射极 E 的等效电路

由等效电路图和三极管的工作原理可知,正常情况下,按图 9.4.2(a) 连接时,构成了三极管的共射放大状态,故此时流过表的电流最大,即电阻值最小。具体判断方法是:先把万用表拨到 $R \times 1k\Omega$ 挡,再把黑表笔接到假定的 C 极,红表笔接到假定的 E 极,并用两只手分别捏住 B、C 二电极(但绝不能使 b、c 直接接触)。通过人体,相当于 B、C 之间接入偏置电阻 R_b , 读出并记下所测的电阻值。然后将红黑表笔对换位置重测重读。在 4 次测量读数中电阻值最小的一次,黑表笔所接的引脚为集电极 C,红表笔所接的引脚为发射极 E。若 4 次测量的电阻值差别不大,说明该三极管性能严重恶化或损坏。有条件时,可用 $100k\Omega$ 左右的电阻作为 R_b 接入图 9.4.2 所示的三极管判断等效电路中进行测量判别,会更加稳定可靠。

2. 共发射极放大电路

单级放大器是构成多级放大器和复杂电路的基本单元。其功能是在不失真的条件下,对输入信号进行放大。要使放大器正常工作,必须设置合适的静态工作点。静态工作点 Q 的设置:一要满足放大倍数、输入电阻、输出电阻、非线性失真等各项指标的要求;二要满足当外界环境等条件发生变化时,静态工作点要保持稳定。影响静态工作点的因素较多,但当晶体管确定之后,主要的影响因素取决于偏置电路,如电源电压的变动、集电极电阻 R_c 和基极偏置电阻的改变等都会影响静态工作点。

为了稳定静态工作点,经常采用具有直流电流负反馈的分压式偏置电路。单管放大器实验电路如图 9.4.3 所示。电路中上偏置电阻 R_{b1} 由 R'_{b1} 和 R_p 串联组成, R_p 是为调节三极管静态工作点而设置的可调电位器; R_{b2} 为下偏置电阻; R_c 为集电极电阻; R_e 为发射极电流负反馈电阻,起到稳定直流工作点的作用; C_1 和 C_2 为交流耦合电容; C_e 为发射极旁路电容,为交流信号提供通路; R_s 为测试电阻,以便测量输入电阻; R_L 为负载电阻。外加输入的交流信号 u_s 经 C_1 耦合到三极管基极,经过放大器放大后从三极管的集电极输出,再经 C_2 耦合到负载电阻 R_L 上。

(1) 静态工作点的估算

分压式偏置放大电路具有稳定 Q 点的作用,在实际电路中应用广泛。为保证 Q 点的稳定,对于硅材料的三极管而言,估算时一般选取流过 R_{b2} 的静态电流 $I_2 = (5 \sim 10)I_{BQ}$,基极电位 $V_{BQ} = (5 \sim 10)U_{BEQ}$ 。

由分压式偏置电路的直流通路可得

$$V_{BQ} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} \quad I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \quad U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

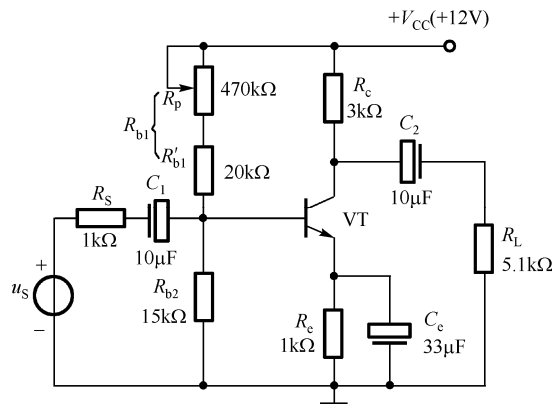


图 9.4.3 实验电路原理图

(2) 放大电路的动态指标

根据理论分析和工程估算法,可得如图 9.4.3 所示的单管放大器实验电路正常工作时的主要动态性能指标如下。

$$\text{交流电压放大倍数: } \dot{A}_u = -\frac{\beta(R_L // R_c)}{r_{be}}$$

$$\text{输入电阻: } r_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

$$\text{输出电阻: } r_o \approx R_c$$

$$\text{其中, } r_{be} \text{ 为三极管输入电阻,其值为: } r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}, \quad r_{bb'}$$

为基区体电阻,可查手册,如无特殊说明则近似取值为 300Ω ; U_T 称为热电压,常温下取值 26mV 。

需要注意,测量放大电路的动态指标必须在输出波形不失真的条件下进行。

(3) 放大电路电压增益的幅频特性和通频带

放大电路的电压增益是频率的函数,电压增益的大小与频率的函数关系即是幅频特性。单管阻容耦合放大电路的幅频特性曲线如图 9.4.4 所

示, A_{um} 为中频电压放大倍数, 通常规定电压放大倍数随频率的变化下降到中频放大倍数的 $1/\sqrt{2}$ 倍, 即 $0.707A_{um}$ 时, 所对应的频率分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H , 则通频带 $BW=f_H-f_L$ 。实验中, 常用逐点法或扫描法来测量电压增益的幅频特性曲线。

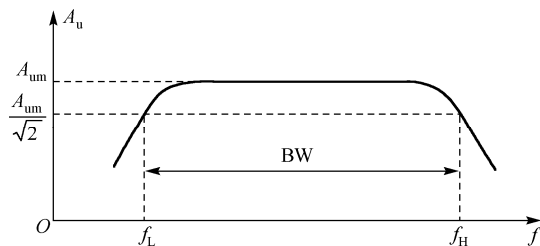


图 9.4.4 幅频特性曲线

四、实验设计任务

电路如图 9.4.3 所示, 已知单管放大器所用的晶体三极管型号为 9013 (或者其他 NPN 类型的管子), $\beta=100$, 电路工作电源 V_{CC} 为 12V, 设 $I_{CQ}=2.4\text{mA}$, $R_L=5.1\text{k}\Omega$ 。根据以上要求, 设计、计算并选取电路器件参数, 使放大器能够不失真地放大常用的正弦波信号, 并达到 $|A_u|\geq 80$ 倍的要求。

五、实验内容及步骤

1. 三极管类型和电极的判断

选用一只常用的塑封小功率三极管, 如 9011 型三极管等, 用指针式万用表的欧姆挡判别出类型 (是 NPN 型, 还是 PNP 型) 和 3 只引脚对应的电极位置, 然后分别用 E (发射极)、B (基极)、C (集电极) 标注在如图 9.4.5 所示对应的引脚中。

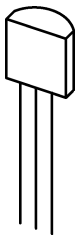


图 9.4.5 三极管引脚位置标注示意图

2. 正确设计和组装共发射极放大电路

(1) 根据实验电路原理图 9.4.3 和所设计选定的参数, 正确搭建实验电路。

根据图 9.4.3 中静态工作点的估算及其动态指标, R'_{b1} 、 R_{b2} 可采用 $10\sim 30\text{k}\Omega$ 电阻, R_p 可采用 $300\sim 500\text{k}\Omega$ 电位器, R_c 、 R_e 、 R_s 、 R_L 可采用 $1\sim 5\text{k}\Omega$ 电阻, 耦合电容 C_1 、 C_2 和旁路电容 C_e 可采用 $10\sim 30\mu\text{F}$ 电解电容, 按此选取的一组参数如图 9.4.3 所示, 供参考。

(2) 组装之前须测量和调节电源电压, 使其为所需要的值, 并注意电源的极性和信号源的接地线都不能接错, 不能带电接线。

(3) 将函数信号发生器的输出波形选择为正弦波, 调节信号的频率为 1kHz 左右, 幅值为 $15\sim 20\text{mV}$, 并按照图 9.4.3 中 u_s 的极性要求接入放大器的输入端。

(4) 将示波器的各开关、旋钮选择在相应合适的挡位, 并将其测试连接线接到放大器的输出端, 完成实验电路的搭建制作。

3. 静态工作点的调节与测量

(1) 静态工作点的调节

根据设计任务, 反复调节电位器 R_p 和函数信号发生器的输出幅度微调旋钮, 使三极管工作在放大区, 并且有合适的工作点 $I_{CQ}=2.4\text{mA}$ 。此时, 示波器显示的放大器输出正弦波形不失真, 且有很大的电压放大倍数 (一般 $|A_u|$ 为几十倍到 200 倍之间), 表示放大器的直流工作点调试完成。

(2) 静态工作点的测量

完成直流工作点的调节之后, 断开输入信号, 再用万用表测量此时放大器的静态工作点, 并记录于表 9.4.2 中。其中, I_{EQ} 和 I_{CQ} 一般用所测的相应电压和已知的电阻值通过计算确定, 即间接测量方法得到。为了理论分析计算, 此时应测出电位器 R_p 的阻值为 _____ Ω 。

表 9.4.2 放大器静态工作点测量记录表

测量值 (V)				计算值 (mA)	
U_{CEQ}	U_{BEQ}	V_{EQ}	V_{CQ}	$I_{EQ} = V_{EQ} / R_c$	$I_{CQ} = (V_{CC} - V_{CQ}) / R_c$

注意：一般硅管的 U_{BEQ} 约为 0.7V 左右， $I_{EQ} \approx I_{CQ}$ ，否则为电路有误或者测量错误。

4. 放大器动态性能指标的测量

完成静态工作点测量之后，接入输入信号，测量和计算放大电路的动态指标并记录于表 9.4.3 中。

表 9.4.3 放大器动态参数测量与计算记录表

测量值	$U_s(\text{mV})$	$U_i(\text{mV})$	$U_{oL}(\text{V})$	$U_o(\text{V})$
测量计算值	$\dot{A}_u = -\frac{U_{oL}}{U_i}$	$r_i = \frac{U_i R_s}{U_s - U_i} (\text{k}\Omega)$	$r_o = \left(\frac{U_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L (\text{k}\Omega)$	
理论计算值	$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_L // R_c)}{r_{be}}$	$r_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} (\text{k}\Omega)$	$r_o \approx R_c (\text{k}\Omega)$	
相对误差				

(1) 电压增益 A_u 的测量

接通放大器的输入信号，即保持原来调好的输入正弦波信号的频率和幅值，用示波器观察放大器输出端有放大且不失真的正弦波后，用万用表或毫伏表分别测出其输出电压 U_{oL} 和输入电压 U_i 的有效值，即可得到电压增益：

$$\dot{A}_u = -\frac{U_{oL}}{U_i}$$

(2) 输入电阻 r_i 的测量

r_i 为放大器输入端看进去的交流等效电阻，它等于放大器输入端信号电压 U_i 与输入电流 I_i 的有效值之比。即 $r_i = \frac{U_i}{I_i}$ 。本实验采用换算法测量输入电阻。测量电路如图 9.4.6 所示。在信号源与放大器之间串入一个已知电阻 R_s ，只要分别测出 U_s 和 U_i ，即可得知输入电阻为：

$$r_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{(U_s - U_i) / R_s} = \frac{U_i R_s}{U_s - U_i}$$

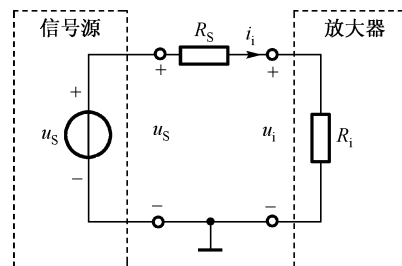


图 9.4.6 用换算法测量输入电阻 r_i 的电路

(3) 输出电阻 r_o 的测量

r_o 系指放大器输出等效电路中将信号源视为短路时，从输出端向放大器看进去的交流等效电阻。它的大小能够说明放大器承受负载的能力，其值越小，带负载能力越强。用换算法测量 r_o 的电路如图 9.4.7 所示，即

$$r_o = \left(\frac{U_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L$$

(4) 幅频特性及通频带 f_{BW} 的测量

保持输入信号的幅值不变，调节函数发生器的频率，记录多个频率点情况下放大电路的输出电压 U_o ，记录于表 9.4.4 中。计算电压增益，采用描点法绘出放大电路的幅频特性曲线。由曲线即可确定放大电路的上、下限截止频率 f_H 、 f_L 以及频带宽度 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。测量时

应注意取点要恰当，在低频段与高频段应多测几点，在中频段可以少测几点。此外，在改变频率时，要保持输入信号的幅度不变，且输出波形不失真。

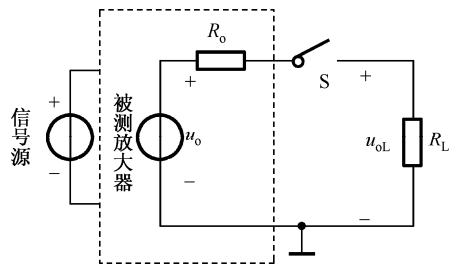


图 9.4.7 测量输出电阻 r_o 的电路

表 9.4.4 放大器幅频特性的测量与计算记录表

$f(\text{kHz})$				f_o			
$U_o(\text{V})$							
$A_u = U_o/U_i$							

通频带的另一简单测量方法是：给放大器输入中频信号，如 $f = 1\text{kHz}$ ，在其输出端有正常的放大波形时，测出其电压值为 U_o ，然后维持 U_i 不变，增加信号源的频率直到输出电压下降到 $0.707U_o$ 为止，此时对应的输入信号的频率就是上限频率 f_H 。同理，保持 U_i 不变，降低信号源的频率直到输出电压下降到 $0.707U_o$ 为止，此时输入信号的频率就是下限频率 f_L 。须多次反复调节信号源的频率和输出电压幅度才能完成测量。

记录上限频率 $f_H =$ _____ kHz，下限频率 $f_L =$ _____ kHz，
计算 $f_{BW} =$ _____ kHz。

(5) 发射极电阻对动态性能的影响。

保持静态工作点不变，将图 9.4.3 中的电阻 R_e 分成两部分 (R_{e1} 和 R_{e2})， R_{e1} 的阻值范围最好在几十欧到几百欧之间，其他参数不变，电路如

图 9.4.8 所示。测量放大电路动态性能指标，记录数据于表 9.4.5 中，并与上面测试结果比较，总结发射极电阻对放大电路动态特性的影响。

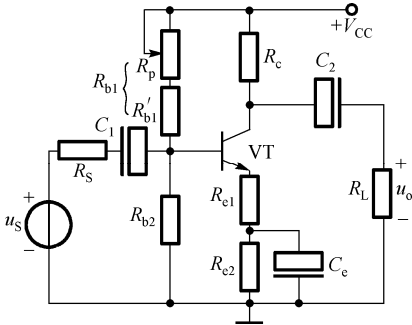


图 9.4.8 改接后的实验电路

表 9.4.5 发射极电阻对动态性能的影响

测量值	$U_s(\text{mV})$	$U_i(\text{mV})$	$U_{oL}(\text{V})$	$U_o(\text{V})$
测量计算值	$\dot{A}_u = -\frac{U_{oL}}{U_i}$		$r_i = \frac{U_i R_s}{U_s - U_i} (\text{k}\Omega)$	$r_o = \left(\frac{U_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L (\text{k}\Omega)$

(6) 3 种失真波形的调节与观察

① 既饱和又截止失真波形

大大增加信号源的输出电压幅度（必要时再略调 R_p ），使放大器输出端同时出现正负向失真，将示波器观察到的失真波形画出。

② 饱和失真波形

降低 R_p 值，使 U_{CEQ} 的值很小，即放大器工作在饱和区，测画出示波器此时显示出的输出波形即为放大器的饱和失真波形（一般是指输出波形的负半周被削平）。

③ 截止失真波形

增大 R_p 值，使放大器工作在截止区，即 U_{CEQ} 很大，测画出示波

器观察到的截止失真波形（一般是指输出波形的正半周被削平）。将3种失真波形画于表9.4.6中。

表 9.4.6 失真波形的调节与观察

失真类型	截止失真	饱和失真	既饱和又截止失真
波形			

六、预习要求

1. 预习三极管的特性及其工作原理。
2. 预习共发射极放大电路的实验原理和测量方法。
3. 完成电路的参数设计，画出完整正确的实验电路图。
4. 明确实验内容，写出实验步骤。

七、注意事项

1. 用指针式万用表判断三极管的性能和极性时，在选好量程后，应进行调零和简单必要的校对，方可进行测试，不致造成误测误判。
2. 偏置电阻 R_{b1} 和 R_{b2} 的值不能取得太小，过小的偏置电阻会使静态功耗增大，且引起信号源的分流过大，使放大电路输入电阻变小。
3. 一般来说， C_1 、 C_2 和 C_e 越大，低频特性越好，但电容过大体积也大，既不经济又会增加分布电容，影响高频特性，且大容量的电解电容的漏电电流也大。电容的选择一般能满足放大电路的下限频率即可。
4. 为了静态工作点调节的方便，应该选择较大阻值的电位器 R_p 。
5. 放大电路输入电压的幅值不能太大，一般选取几至二十几毫伏，否则输出信号会严重失真。

八、思考题

1. 能否用数字万用表测量图 9.4.3 所示放大电路的电压增益及幅频特性，为什么？

2. 如图 9.4.3 所示的电路中，一般是改变上偏置电阻 R_{b1} 来调节静态工作点，为什么？改变下偏置电阻 R_{b2} 来调节静态工作点可以吗？调节 R_e 呢？为什么？

3. 若 C_e 严重漏电或者容量失效而开路，分别会对放大器产生什么影响？

9.5 负反馈放大电路

一、实验目的

1. 了解负反馈放大电路的工作原理。
2. 加深理解放大电路中引入负反馈的方法和负反馈对放大器各项性能指标的影响。
3. 掌握负反馈放大器性能指标的测试方法。

二、实验仪器及元器件

根据本实验所用到的仪器及元器件，将实验仪器及元器件的名称、型号、主要功能填写在表 9.5.1 中。

表 9.5.1 实验仪器及元器件

序号	仪器及元器件名称	型 号	主 要 功 能
1			
2			
3			
4			
5			
6			

三、实验原理

负反馈在电子电路中有着非常广泛的应用。虽然它使放大器的放大倍数降低,但能在多方面改善放大器的动态性能和指标,如稳定放大倍数、改变输入/输出电阻、减小非线性失真和展宽通频带等,因此,几乎所有的放大器都带有负反馈。

负反馈放大器有 4 种组态或形式,即电压串联、电压并联、电流串联和电流并联负反馈。电压负反馈能起到稳定输出电压,降低放大器输出电阻的作用;电流负反馈能起到稳定输出电流,提高放大器的输出电阻的作用;串联负反馈能提高放大器的输入电阻;并联负反馈能降低放大器的输入电阻。本实验以电压串联和并联负反馈为例,研究分析负反馈对放大器各项性能指标的影响。

1. 电压串联负反馈放大器

由分立元件组成的电压串联负反馈放大电路如图 9.5.1 所示。该电路由两级单管放大器和反馈阻容器件 R_f 和 C_f 组成。在电路中通过把放大器的输出电压 U_o 引回到输入端,加在晶体管 VT_1 的发射极上,在发射极电阻 $(R_e + R_{e1})$ 上形成反馈电压 U_F 。

图 9.5.1 所示电压串联负反馈放大器的主要性能指标如下。

(1) 闭环电压放大倍数

$$A_{uF} = \frac{A_u}{1 + A_u F_u}$$

式中, $A_u = U_o / U_i$ 为两级放大器(无反馈时)的电压放大倍数,即开环增益; $(1 + A_u F_u)$ 为反馈深度,它的大小决定了负反馈对放大器性能改善的程度。

(2) 反馈系数

$$F_u = \frac{R_{e1} + R_e}{R_{e1} + R_e + R_f}$$

(3) 输入电阻

$$r_{if} = (1 + A_u F_u) r_i$$

式中, r_i 为无反馈时两级放大器的输入电阻(不包括偏置电阻)。

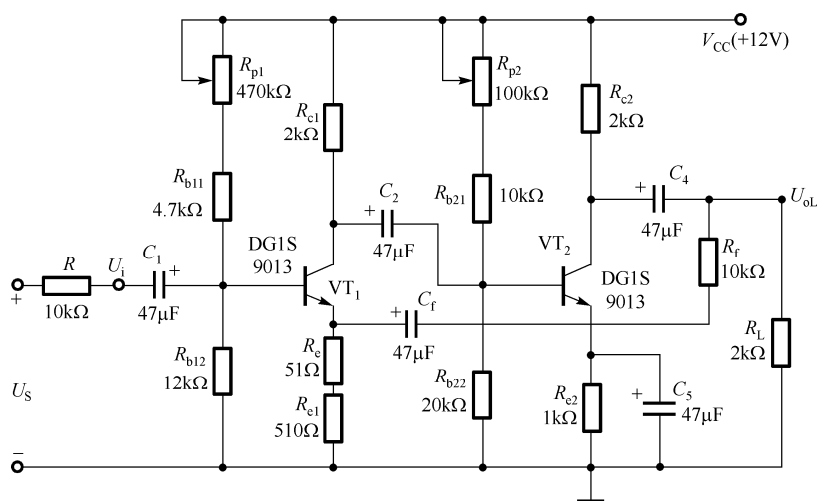


图 9.5.1 电压串联负反馈放大电路

(4) 输出电阻

$$r_{of} = \frac{r_o}{1 + A_{uo} F_u}$$

式中, r_o 为两级放大器的输出电阻; A_{uo} 为两级放大器的负载电阻 R_L 开路时的电压增益。

2. 电压并联负反馈放大电路

由于两级单管放大器组成的电压串联负反馈放大器电路较复杂,所用器件和连线多。下面介绍一种由集成运算放大器组成的电压并联负反馈放大器,其电路形式如图 9.5.2 所示。

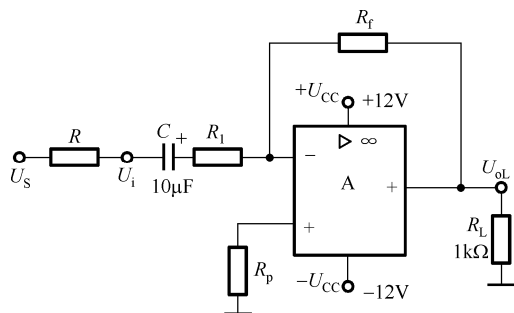


图 9.5.2 电压并联负反馈放大电路

该电路主要由集成运放、反馈电阻 R_f 、比例电阻 R_1 、平衡电阻 R_p 及耦合电容 C 组成。根据运放的“虚断”和“虚短”概念可得该电路的闭环电压增益： $A_{uf} = U_{oL} / U_i = -R_f / R_1$ 。该式说明加了负反馈之后的电压增益与其他参数无关，只与 R_f 与 R_1 的比值有关，大大提高了电压增益的稳定性。电路中的反馈信号是从放大器的输出端通过反馈电阻 R_f 引入到运放的反相输入端，构成电压并联负反馈，因此具有稳定输出电压，降低输出电阻和输入电阻的功能。

四、电路参数设计

设计一个由集成运放组成的电压并联负反馈放大器的实验电路。已知条件： $A_{uf} = -10$ 倍，运放的工作电源为 $\pm 12V$ ，并设运放的差模输入电阻 $r_{id} = 2 \times 10^7 \Omega$ ，运放的输出电阻 $r_o = 100 \Omega$ 。设计、计算和确定其电路参数及运放型号，在电路中标注其脚号，并画出完整、正确的实验电路图。其设计过程如下。

1. 电路形式及运放型号的确定

根据设计要求可选用如图 9.5.2 所示的电路形式。运放可选用通用型运放 $\mu A741$ 或双运放 LM358 等。

2. 反馈电阻 R_f 的设计与确定

$$\text{最佳反馈电阻 } R_f = \sqrt{\frac{r_{id} r_o (1 - A_{uf})}{2}}$$

根据实验箱（台）中现有的电阻，取 $R_f =$ _____。

3. 比例电阻 R_1 的设计确定

$$R_1 = \frac{R_f}{-A_{uf}} \quad \text{取 } R_1 = \text{_____。}$$

4. 平衡电阻 R_p 的设计确定

$$R_p = R_1 // R_f$$

为了减少电阻串、并联带来的接线增多，在实验中可取 R_f 、 R_1 、 R_p 为整数值，但必须满足 $R_f / R_1 = 10$ 倍的要求， R_p 可近似取值。

五、实验内容

1. 电压串联负反馈放大器

(1) 正确连接组装图 9.5.1 所示两级单管放大器实验电路。断开反馈网络支路 C_f 和 R_f 。

(2) 将 $f = 1kHz$ ， U_i 约为 $5mV$ 的正弦波信号输入放大器，调节电位器 R_{p1} 和 R_{p2} ，使放大器输出放大且不失真的正弦波，再用交流电压表等分别测量 U_i 、 U_s 、 U_o （负载开路时）、 U_{oL} （接有负载时）、 f_{Hf} 和 f_{Lf} 的值，记录于表 9.5.2 中，并计算开环放大电路的性能指标。

(3) 关掉电源，接入反馈网络支路 C_f 和 R_f 。然后开启电源，输入与 (2) 中相同的正弦波信号，适当调节电路，使放大器输出放大且不失真的正弦波，用交流电压表等分别测量 U_{Sf} 、 U_{if} 、 U_{of} （负载开路时）、 U_{oLf} （接有负载时）、 f_{Hf} 和 f_{Lf} 的值，记录于表 9.5.2 中，并计算闭环放大电路的性能指标。

表 9.5.2 电压串联负反馈放大器实验数据记录表

	测 量 值						计 算 值				
开环放大电路	U_S/mV	U_i/mV	U_{oL}/V	U_o/V	f_H/kHz	f_L/kHz	$A_u = -U_o/U_i$	$A_{uo} = -U_o/U_i$	$r_i = U_i R / (U_S - U_i)$	$r_o = (U_o/U_{oL} - 1)R_L$	$BW = f_H - f_L$
闭环放大电路	U_{Si}/mV	U_{ii}/mV	U_{oLi}/V	U_{oi}/V	f_{Hi}/kHz	f_{Li}/kHz	$A_{uf} = -U_{oi}/U_{ii}$	$A_{uof} = -U_{oi}/U_{ii}$	$r_{if} = U_{ii} R / (U_{Si} - U_{ii})$	$r_{of} = (U_{oi}/U_{oLi} - 1)R_L$	$BW_f = f_{Hi} - f_{Li}$

(4) 改变负载电阻 R_L 值，测量负反馈放大器的输出电压以验证负反馈对输出电压的稳定作用，记录测量数据于表 9.5.3 中。

表 9.5.3 负载变化时实验数据记录表

	开环放大电路		闭环放大电路	
R_L	2k Ω	5.1k Ω	2k Ω	5.1k Ω
U_{oL}				

2. 电压并联负反馈放大器

(1) 根据要求正确组装如图 9.5.2 所示的实验电路，调节函数信

号发生器有关旋钮，使输入信号为有效值 $U_i = 100\text{mV}$ ，频率 $f = 1\text{kHz}$ 的正弦波信号，使放大器能正常地按要求放大信号。

(2) 用交流电压表等仪器分别测量 U_i 、 U_S 、 U_o 、 U_{oL} 、 f_H 、 f_L 的值，记录于表 9.5.4 中。

(3) 将如图 9.5.2 所示电路中的电阻 R_f 改为 $3R_f$ 后接入电路中，其余参数不变，再用交流电压表等仪器分别测量 U_i 、 U_S 、 U_o 、 U_{oL} 、 f_H 、 f_L 的各项值，记录于表 9.5.4 中，并计算出电压增益、输入电阻、输出电阻以及通频带的值。

表 9.5.4 电压并联负反馈放大器实验数据记录表

	测 量 值						计 算 值			
	U_i/mV	U_S/mV	U_o/V	U_{oL}/V	f_H/kHz	f_L/kHz	$A_{uf} = -U_o/U_i$	$r_{if} = U_i R / (U_S - U_i)$	$r_{of} = (U_o/U_{oL} - 1)R_L$	$BW = f_H - f_L$
$A_{uf} = -10$										
$A_{uf} = -30$										

3. 观察负反馈对非线性失真的改善

(1) 断开如图 9.5.1 所示电路中的反馈网络支路 C_f 和 R_f ，在输入端加入 $f=1\text{kHz}$ 的正弦波信号，输出端接示波器，逐渐增大输入信号的幅度，使输出波形刚出现失真（但失真不严重），记下此时的波形和输出电压的幅度。

(2) 接入如图 9.5.1 所示电路中的反馈网络支路 C_f 和 R_f 构成电压串联负反馈放大器，增大输入信号幅度，使其输出电压幅度的大小与 (1) 中的相同，比较有负反馈时，输出波形的变化，并记录其波形。

(3) 比较分析放大器在引入负反馈后对非线性失真的改善情况。

六、预习要求

1. 预习实验原理，理解负反馈放大器的 4 种组态。
2. 根据所给的条件，完成实验电路参数的设计，画出完整、正确的实验电路。
3. 明确和理解必做的实验内容，画出须测量、记录的表格。

七、思考题

1. 负反馈放大器有哪 4 种组成形式，各种组成形式的作用是什么？
2. 如果把失真的信号加入到放大器的输入端，能否用负反馈的方式来改善放大器输出波形的失真？
3. 若本实验的电压串联负反馈电路是深度负反馈，试估算其电压放大倍数。

9.6 电平检测器的设计与调测

一、实验目的

1. 了解具有滞回特性的电平检测器的电路组成及工作原理。

2. 熟悉用电平检测器设计满足一定要求的实用电路。
3. 掌握电平检测器控制电压精度的调测方法。

二、实验仪器及元器件

根据本实验所用到的仪器及元器件，将实验仪器及元器件的名称、型号、主要功能填写于表 9.6.1 中。

表 9.6.1 实验仪器及元器件

序号	仪器及元器件名称	型 号	主 要 功 能
1			
2			
3			
4			
5			
6			

三、实验原理

具有滞回特性的电平检测器是一种具有实用意义的实验电路，一般用于对模拟信号电压进行幅度检测、鉴别。按其电路结构和传输特性的不同，可分为滞回特性反相电平检测器和滞回特性同相电平检测器两类，下面分别进行讨论。

1. 滞回特性反相电平检测器

滞回特性反相电平检测器的原理电路和电压传输特性如图 9.6.1 所示。

根据原理电路和叠加定理不难得出：

$$\text{上门限电平} \quad U_{HT} = U_R \frac{n}{n+1} + \frac{U_{OM}}{n+1}$$

$$\text{下门限电平} \quad U_{LT} = U_R \frac{n}{n+1} - \frac{U_{OM}}{n+1}$$

$$\text{回差电压} \quad U_H = U_{HT} - U_{LT} = \frac{2U_{OM}}{n+1}$$

$$\text{中心电压} \quad U_{CTR} = \frac{U_{HT} + U_{LT}}{2} = U_R \frac{n}{n+1}$$

由此可见，这个电路的特点是：反馈电阻比 n 及参考电压 U_R 决定了 U_{HT} 、 U_{LT} 、 U_H 及 U_{CTR} ；中心电压 U_{CTR} 及回差电压 U_H 不能独立调节，只要 n 改变，两者同时变化，这给电路调试带来了不便。

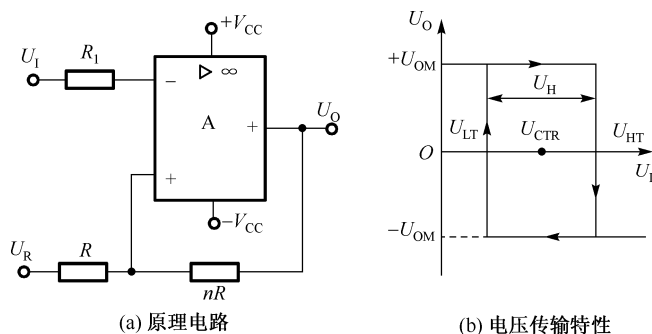


图 9.6.1 具有滞回特性的反相电平检测器

2. 滞回特性同相电平检测器

滞回特性同相电平检测器的原理电路和电压传输特性如图 9.6.2 所示。

根据原理电路可得：

$$\text{上门限电压} \quad U_{HT} = \frac{U_{OM}}{n} - \frac{U_R}{m}$$

$$\text{下门限电压} \quad U_{LT} = -\frac{U_{OM}}{n} - \frac{U_R}{m}$$

$$\text{回差电压} \quad U_H = U_{HT} - U_{LT} = \frac{2U_{OM}}{n}$$

$$\text{中心电压} \quad U_{CTR} = \frac{U_{HT} + U_{LT}}{2} = -\frac{U_R}{m}$$

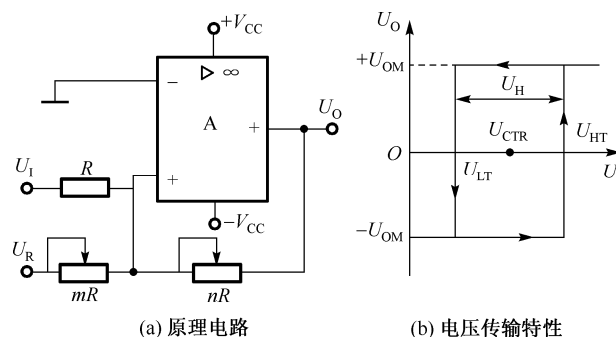


图 9.6.2 具有滞回特性的同相电平检测器

由此可见，这一电路的特点是：中心电压 U_{CTR} 取决于 U_R 及 m ；回差电压 U_H 取决于 U_{OM} 和 n ，两者可以分别独立调节。

3. 具有滞回特性电平检测器的应用

如图 9.6.3 所示，电路由滞回特性同相电平检测器外加驱动电路及指示电路等组成。其中，驱动电路由电阻 R_b 、二极管 VD 和三极管 VT 组成，指示电路由发光二极管 VL₁ 和 VL₂ 以及限流电阻 R_3 、 R_4 等组成。由集成运放和电阻 R 、 R_1 、 R_2 及电位器 R_{p1} 、 R_{p2} 组成的同相电平检测器是整个实验电路的核心。电源电压值和电阻 R 、 R_1 及电位器 R_{p1} 决定回差电压 U_H 的大小，在其他条件不变的情况下， U_H 随着电位器 R_{p1} 值的增加而变小。电阻 R 、 R_2 和电位器 R_{p2} 等决定上下门限电平和中心电压 U_{CTR} 的大小，在其他条件不变的情况下，中心电压 U_{CTR} 随着电位器 R_{p2} 阻值的增加而变小，上门限电平 U_{HT} 随着电位器 R_{p1}

或 R_{p2} 阻值的增加而变小, 下门限电平 U_{LT} 随着电位器 R_{p1} 阻值的增加而变大或者随着 R_{p2} 阻值的增加而变小。

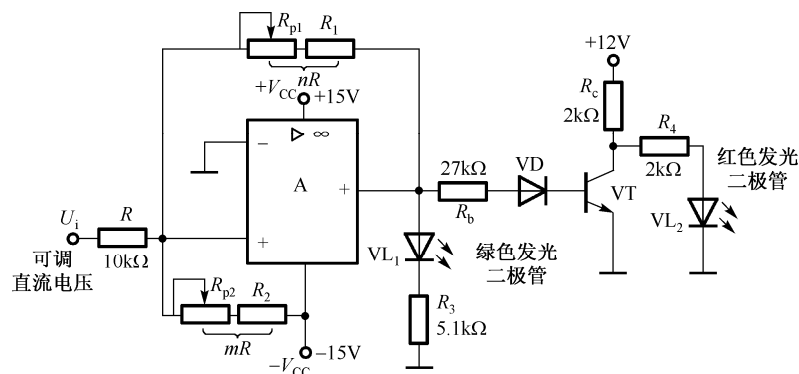


图 9.6.3 具有滞回特性电平检测器的应用电路

四、实验内容及步骤

1. 设计如图 9.6.3 的实验电路, 要求: 当直流电源调节到 13.5V 时, 绿灯点亮, 当其电压下降至 10.5V 时, 红灯点亮。假设三极管 VT 的集电极工作电流为 50mA, $\beta=100$ 。

2. 根据所设计的实验电路进行正确组装和连接, 注意三组电源的极性和电压值不能接错。

3. 根据设计要求反复耐心地调节电路中的两个电位器 R_{p1} 和 R_{p2} 及可调直流稳压电源, 以达到设计要求的 1% 误差之内, 然后记录实验结果, 即红灯开始点亮时的电压 $U_{LT} = \underline{\hspace{2cm}}$ V, 绿灯开始点亮时的电压 $U_{HT} = \underline{\hspace{2cm}}$ V。

4. 按照 $U_{LT} = 4V$, $U_{HT} = 6V$ 的要求重新设计 nR 和 mR 的阻值, 并调节电位器 R_{p1} 和 R_{p2} 的阻值, 使实验结果的误差不超过设计要求的 5%, 并记录 $U_{LT} = \underline{\hspace{2cm}}$ V 和 $U_{HT} = \underline{\hspace{2cm}}$ V。

5. 断开可调的直流电压源, 接入大小合适 (10~20V) 的三角波输入电压, 测量并画出其输入和输出电压波形, 并标出 U_{LT} 和 U_{HT} 。

五、预习要求

1. 熟悉具有滞回特性的电平检测器电路结构、工作原理及电压传输特性。
2. 按要求完成实验电路的设计, 选择元件参数及调测步骤。
3. 按照 $U_{LT} = 4V$, $U_{HT} = 6V$ 的设计要求重新设计电路参数, 完成预习报告的写作。

六、注意事项

1. 电阻 nR 和 mR 的取值尽可能地精确, 否则所测的实验结果误差较大。
2. 电路中 3 个电源的地线必须等电位。
3. 可调电阻 R_{p1} 和 R_{p2} 的阻值调节固定后再接入电路。
4. 接入三角波时, 应注意输入电压的幅值。
5. 示波器两通道同时输入信号时, 要先将输入耦合方式放在 GND 位置, 两条水平线调重合, 然后再将其放在 AC 位置, 观察并记录输入波形与输出波形的交点。

七、思考题

1. 如图 9.6.3 所示电路中的二极管 VD 起什么作用?
2. 实验电路中, 驱动三极管 VT 的基极电阻 R_b 的阻值应如何确定? 取值过大或过小会产生什么问题?
3. 如果将本实验设计中要求的电压值 10.5V 改为 11.5V, 13.5V 改为 12.5V, 此时应如何改动电路参数?

9.7 波形产生电路

一、实验目的

- 1. 了解集成运算放大器在信号产生方面的广泛应用。
- 2. 掌握由集成运放构成的正弦波发生器、矩形波发生器、方波和三角波发生器、锯齿波发生器的电路组成及工作原理。
- 3. 掌握上述波形产生电路的设计和调试方法及振荡频率和输出幅度的测量方法。

二、实验仪器及元器件

根据本实验所用到的仪器及元器件，将实验仪器及元器件的名称、型号、主要功能填写在表 9.7.1 中。

表 9.7.1 实验仪器及元器件

序号	仪器及元器件名称	型 号	主 要 功 能
1			
2			
3			
4			
5			
6			

三、实验原理

在集成运放的输入和输出端之间施加正反馈或正负反馈结合构成各种信号产生电路，产生正弦波、方波、矩形波、三角波、锯齿波等。下面分别对部分波形产生电路的结构、组成和工作原理进行分析和讨论。

1. 正弦波信号发生器

正弦波产生电路的原理图如图 9.7.1 所示。它是在集成运放输出端与输入端之间施加了正负两种反馈结合而构成的文氏电桥正弦波产生电路。

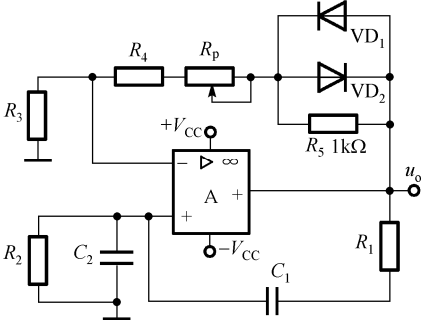


图 9.7.1 文氏电桥正弦波发生器原理电路

如图 9.7.1 所示，电路中 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 串并联网路构成正反馈支路， R_3 、 R_4 、 R_p 、 R_5 等构成负反馈支路，反馈电阻 $R_f = R_4 + R_p + R_5 // R_D$ ，式中的 R_D 是二极管正向导通电阻。电位器 R_p 用于调节反馈深度以满足起振条件和改善波形，二极管 VD_1 、 VD_2 利用其自身正向导通电阻的非线性来自动地调节电路的闭环放大倍数以稳定波形的幅度。

根据图 9.7.1 的电路和自激振荡的基本条件，电路参数取值应满足 $A_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_3} \geq 3$ ，即 $R_f \geq 2R_3$ 时电路才能维持振荡输出。当电路中取

$R_1 = R_2 = R$ ， $C_1 = C_2 = C$ 时，电路振荡频率为 $f = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

2. 矩形波发生器

矩形波发生器的原理电路如图 9.7.2 所示。这是一个由集成运放

结合正负反馈网络构成的矩形波发生器, 电阻 R_1 、 R_2 和 R_p 组成正反馈网络, 反馈电阻 R_f 和电容 C 构成负反馈网络。由于该电路正反馈占绝对主导地位, 所以运放输出端 u_o 只能取高电平和低电平两种状态, 即电路输出 u_o 只能取 $+U_Z$ 或 $-U_Z$, u_o 极性的正负取决于电容 C 是充电还是放电。即 $u_- < u_+$ 时, $u_o = U_Z$, C 经 R_f 等充电; 当 $u_- > u_+$ 时, $u_o = -U_Z$, C 经 R_f 等放电。这样周而复始地比较便在输出端产生矩形波。

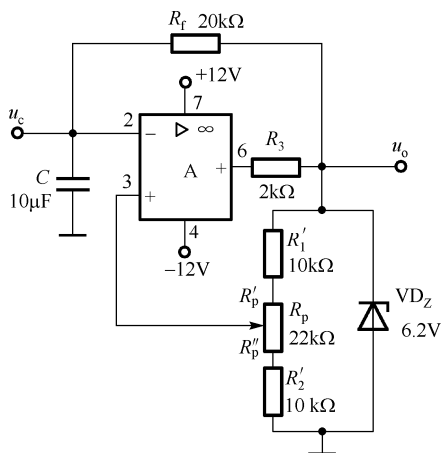


图 9.7.2 矩形波发生器原理电路

由过渡过程知识分析可知, 该矩形波的周期为

$$T = 2R_f C \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right)$$

式中, $R_1 = R'_1 + R'_p$, $R_2 = R'_2 + R''_p$

矩形波的幅值为 $\pm U_Z$, 电容电压 u_c 的幅值 $U_{om} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_Z$, 频率为 $f = \frac{1}{T}$ 。

调节电位器 R_p (即改变 R_2/R_1), 可以改变振荡频率, 但三角波的幅值也随之变化, 如果互不影响, 则可通过改变 R_f (或 C) 来实现振荡频率的调节。

输出波形 u_o 和电容两端 u_c 的波形如图 9.7.3 所示。

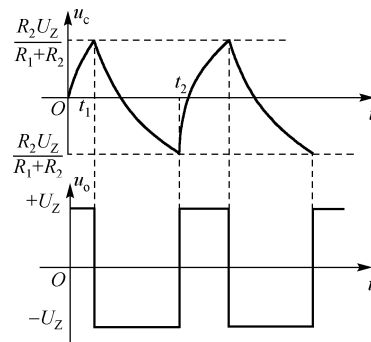


图 9.7.3 矩形波发生器波形图

3. 方波和三角波信号发生器

方波和三角波发生器的原理电路如图 9.7.4 所示。该电路主要由集成运放构成的滞回比较器和积分器组成。比较器中集成运放工作在线性区, 其输出端通常只有高电位和低电位两种状态, 即 $u_+ > u_-$ 时, 输出高电位, $u_+ < u_-$ 时, 输出低电位。积分器中运放工作在线性区, 由于 $u_+ = u_- \approx 0$, $i_+ = i_- \approx 0$, 所以 $i_R = i_C$, 则有

$$u_o = -u_c = -\frac{1}{C} \int \frac{u_{o1}}{R + R_p} dt = -\frac{u_{o1} t}{(R + R_p) C} = -\frac{U_Z t}{(R + R_p) C}$$

A_1 构成同相输入的迟滞比较器, A_2 构成反相积分电路。 A_1 同相端电位由 u_{o1} 和 u_o 共同决定, 而 $u_{o1} = \pm U_Z$, u_o 是积分电路的输出, 又是迟滞比较器的输入。 A_2 积分后有

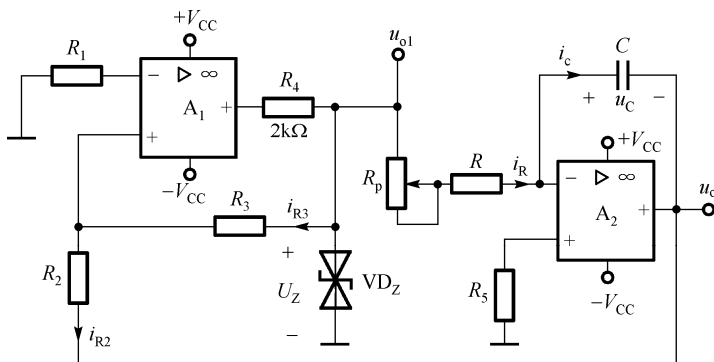


图 9.7.4 方波、三角波发生器原理电路

A_1 在输出电平跳转瞬间满足 $u_+ = u_- \approx 0$ ， $i_+ = i_- \approx 0$ ，所以

$$i_{R2} = i_{R3} = \frac{U_Z}{R_3}。$$

当 $t = t_1$ 时（参见图 9.7.5 的输出波形），三角波有最大峰值

$$U_{OM} = -i_{R2}R_2 = -\frac{R_2U_Z}{R_3}$$

$$\text{即 } U_{OM} = \frac{-U_Z}{(R_p + R)C}t_1 = -\frac{R_2U_Z}{R_3}, \text{ 所以}$$

$$t_1 = \frac{CR_2(R + R_p)}{R_3}$$

从波形图中可知方波和三角波的周期为

$$T = 4t_1 = \frac{4CR_2(R + R_p)}{R_3}$$

故两种波形的频率为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_3}{4CR_2(R + R_p)}$$

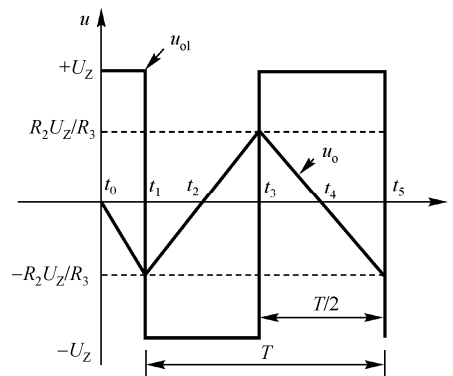


图 9.7.5 方波、三角波发生器输出波形

输出的方波电压幅度由稳压管的稳压值决定，三角波的幅值由稳压值和电阻 R_2 、 R_3 共同决定，而振荡频率 f 与电阻 R_2 、 R_3 、 R 和电容 C 及电位器 R_p 均有关。

4. 锯齿波信号发生器

锯齿波发生器原理电路和输出波形分别如图 9.7.6 和图 9.7.7 所示。原理电路是在方波和三角波发生器电路基础上在积分器输入端增加一条由二极管 VD 串联电阻 R_6 的支路组成的。这条输入回路利用二极管正向导通，反向相截止的原理使得积分器的充放电时间常数不相等。

从图 9.7.6 中可以看出，当积分器输入正电压时， VD 正向导通，积分时间常数为

$$\tau_1 = R_6 // (R + R_p)C$$

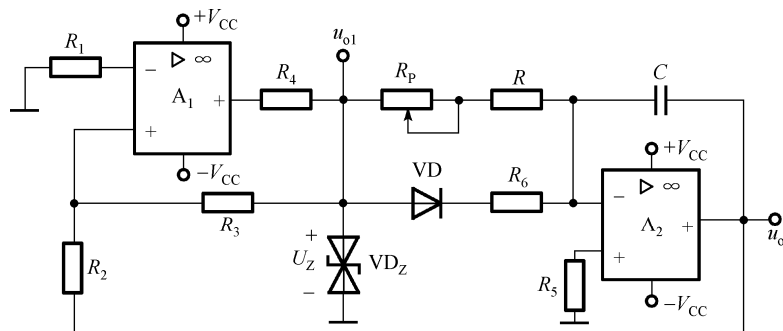


图 9.7.6 锯齿波信号发生器原理电路

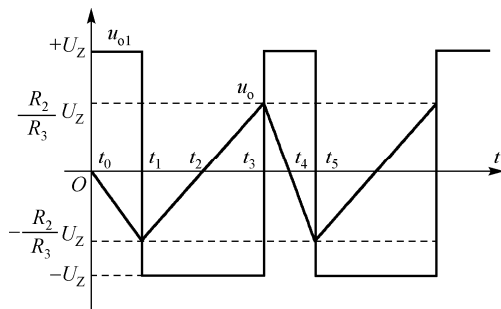


图 9.7.7 锯齿波信号发生器输出波形

当积分器输入为负电压时，VD 反向截止，积分时间常数为

$$\tau_2 = (R + R_p)C$$

即 $\tau_1 < \tau_2$ ，所以称为锯齿波，改变 R_6 的大小可以改变矩形波的占空比和脉冲宽度。

上述电路所产生的锯齿波具有很高的线性度，所以在工程设计中得到了广泛应用。

四、实验内容及步骤

1. 正弦波发生器实验电路的调测

(1) 设计一种用集成运放等器件组成的文氏电桥正弦波发生器实验电路。已知电源电压为 $\pm 12V$ ，要求振荡频率 $f = 1591.5Hz$ 。设计、计算、选择器件型号和参数，画出完整、正确的实验电路。

原理电路如图 9.7.1 所示，参考设计方法如下：

① 集成运放型号的确定：本实验要求工作电源电压为 $\pm 12V$ ，振荡频率要求不高，所以可选用通用型运放 $\mu A741$ 或 LM358 等。

② 选频元件 R 和 C 的确定：根据实验原理和设计要求得知

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = 1591.5Hz \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi Rf}$$

R 的阻值与运放的输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o 应满足 $r_i \gg R \gg r_o$ ，然后再计算 C 的电容值。

③ 二极管型号的确定：为提高电路的温度稳定性， VD_1 、 VD_2 应选用硅管，其特性参数应尽可能一致，以保证输出波形的正负半波对称的要求。本实验电路对二极管的耐压和工作电流要求不高，可选用 4148 型或 1N4001 型二极管。

④ 负反馈网络电阻值的确定：为了减小偏置电流的影响，应尽量满足或接近 $R = R_f // R_3$ 。取 $R_3 \geq R$ ，考虑到振荡条件，则 $R_f = R_4 + R_p / 2 + R_5 // R_D \approx R_4 + R_p / 2 + R_5 / 2 \geq 2R_3$ ，先选定 R_p 和 R_5 的阻值，即可算出 R_4 的值，然后选取确定。 R_5 越小对二极管非线性削弱越大，波形失真越小，但稳幅作用也同时被削弱， R_5 的取值应注意两者兼顾。

(2) 正确组装所设计的正弦波发生器实验电路。

(3) 调节 R_p 等使电路振荡输出失真最小的正弦波。

(4) 测画其输出波形，标注正负幅值和周期 T ，以及单位和坐标等。

(5) 计算频率实测值与理论值的误差, 分析其产生误差的最主的原因(要求指明元器件名称及代号)。

给出一组电路参数供参考:

$$R_1=R_2=15\text{k}\Omega, C_1=C_2=10\mu\text{F}, R_3=10\text{k}\Omega, R_4+R_p=22\text{k}\Omega$$

2. 矩形波发生器实验电路的调测

按图 9.7.2 所示电路接线, 完成矩形波发生器实验电路的搭建。

(1) 将电位器 R_{p1} 调至中心位置, 用双踪示波器观察并描绘出方波 u_o 及近似三角波 u_c 的波形(注意对应关系), 测量其幅值及频率, 并标在波形上。

(2) 改变 R_{p1} 动点的位置, 观察 u_o 、 u_c 幅值及频率的变化情况; 分别把动点调至最上端和最下端, 测出频率范围, 并记录。

(3) 将 R_{p1} 恢复至中心位置, 将稳压管 VD_Z 断开, 观察 u_o 波形的变化, 分析 VD_Z 的限幅作用。

3. 方波和三角波发生器实验电路的调测

(1) 设计一种用集成运放等器件组成的方波和三角波发生器实验电路。已知运放电源为 $\pm 12\text{V}$, 要求振荡频率为 $100\sim 500\text{Hz}$ 可调, 方波和三角波输出幅度分别为 $\pm 6\text{V}$ 、 $\pm 3\text{V}$, 误差均为 $\pm 10\%$ 。设计、计算、选择器件型号和参数, 画出完整、正确的实验电路。

原理电路如图 9.7.4 所示, 参考设计方法如下:

① 集成运放型号确定: 本实验要求振荡频率不高, 所以可选用通用型运放 LM358 或 $\mu\text{A}741$ 等。

② 稳压管型号和限流电阻 R_4 的确定: 根据设计要求, 方波幅度为 $\pm 6\text{V}$, 误差为 $\pm 10\%$, 所以可查手册选用满足稳压值为 $\pm 6\text{V}$, 误差为 $\pm 10\%$, 稳压电流 $\geq 10\text{mA}$, 且温度稳定性好的稳压管型号如 2DW231 或 2DW7B 等

$$R_4 \geq \frac{U_{\text{OM}} - U_{Z\text{min}}}{I_{Z\text{M}}} = \frac{12\text{V} - 5.4\text{V}}{30\text{mA}} = 220\Omega, \text{ 取 } R_4 = 2\text{k}\Omega$$

③ 分压电阻 R_2 、 R_3 和平衡电阻 R_1 的确定: R_2 和 R_3 的作用是提供一个随输出方波电压而变化的基准电压, 并决定三角波的幅值。一般根据三角波幅值来确定 R_2 和 R_3 的阻值。根据电路原理和设计要求可得

$$U_{\text{OM}} = \frac{-U_Z R_2}{R_3} = \frac{\pm 6\text{V} \times R_2}{R_3} = \pm 3\text{V} \Rightarrow R_3 = 2R_2$$

先选取 R_2 电阻值(一般情况下, $R_2 \geq 5.1\text{k}\Omega$, 取值太小会使波形失真严重), 则 R_3 的阻值就随之确定。平衡电阻 $R_1 = R_2 // R_3$ 。

④ 积分元件 R_p 、 R 和 C , 以及平衡电阻 R_5 的确定: 根据实验原理和设计要求, 应有

$$f_{\text{max}} = 500\text{Hz} = \frac{R_3}{4CR_2R}, \text{ 即 } R = \frac{R_3}{4CR_2f_{\text{max}}}$$

选取 C 的值, 并代入已确定的 R_2 和 R_3 的值, 即可求出 R 。为了减小积分漂移, C 应取大些, 但太大则漏电流大, 一般积分电容 C 不超过 $1\mu\text{F}$:

$$f_{\text{min}} = 100\text{Hz} = \frac{R_3}{4CR_2(R + R_p)}, \text{ 即 } R_p = \frac{R_3}{4CR_2f_{\text{min}}} - R$$

平衡电阻 R_5 可取 $10\text{k}\Omega$ 或者取 $R_5 = R$ 。

(2) 正确组装所设计的方波和三角波发生器实验电路, 使电路振荡输出方波和三角波, 并调节 R_p 使波形周期为 5ms 。

(3) 在坐标图上画出方波和三角波, 并标注周期和各自的正负幅值。

(4) 调节 R_p , 测出 T_{max} 和 T_{min} 的值, 并计算 $f_{\text{max}} = \frac{1}{T_{\text{min}}}$ 和 $f_{\text{min}} = \frac{1}{T_{\text{max}}}$ 的值, 然后与理论值进行比较, 分析产生误差的最主要原因(要求指明元器件的名称及代号)。

4. 锯齿波和脉冲波发生器实验电路的调测

(1) 将方波和三角波实验电路改接为矩形波和锯齿波发生器实验电路，电路原理如图 9.7.6 所示。

(2) 测画出脉冲占空比为 $\frac{1}{4}$ 时对应的一组脉冲波和锯齿波的波形。

五、预习要求

1. 预习正弦波、方波和三角波，以及锯齿波发生器电路的工作原理。
2. 根据设计要求，完成正弦波、方波和三角波实验电路的设计。
3. 理解领会实验内容和任务。

六、思考题

1. 在如图 9.7.1 所示的电路中，若将 R_3 的阻值错用为正常值的 10 倍或 $\frac{1}{10}$ 倍，电路输出端将分别出现什么现象？

2. 如果把图 9.7.6 所示的电路中的二极管 VD 反接，其输出波形将如何变化？请画出示意图。

3. 在方波、三角波发生器实验中，要求保持原来所设计的频率不变，现需将三角波的输出幅值由原来的 3V 降为 2.5V，最简单的方法是什么？

参 考 文 献

- 1 康华光. 电子技术基础 (第五版). 北京: 高等教育出版社, 2005
- 2 华成英. 模拟电子技术基本教程. 北京: 清华大学出版社, 2005
- 3 谢嘉奎. 电子线路 (线性部分) (第四版). 北京: 高等教育出版社, 1999
- 4 王文辉, 刘淑英. 电路与电子学 (第三版). 北京: 电子工业出版社, 2005
- 5 方维, 高荔. 电路与电子学基础 (第二版). 北京: 科学出版社, 2005
- 6 夏应清. 模拟电子技术基础. 北京: 科学出版社, 2006
- 7 麻寿光. 电路与电子学. 北京: 高等教育出版社, 2005
- 8 刘京南. 电子电路基础. 北京: 电子工业出版社, 2003
- 9 马积勋. 模拟电子技术重点难点及典型题精解. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- 10 卫行粤, 李森生. 模拟电子技术基础. 北京: 电子工业出版社, 2005
- 11 毕满清. 模拟电子技术基础学习指导及习题详解. 北京: 电子工业出版社, 2011
- 12 华柏兴. 线性电子电路实验. 北京: 电子工业出版社, 2008
- 13 王保均. 电子技术基础及解题指导. 北京: 中国人事出版社, 1999
- 14 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础. 北京: 高等教育出版社, 2001
- 15 陈大钦. 模拟电子技术基础问答·例题·试题. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999
- 16 吴立新. 实用电子技术手册. 北京: 机械工业出版社, 2002
- 17 解月珍, 谢沅清. 电子电路学习指导与解题指南. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006
- 18 杨素行. 模拟电子技术基础简明教程 (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2006
- 19 周淑阁, 付文红, 硕力更, 吴少琴. 模拟电子技术基础. 北京: 高等教育出版社, 2004
- 20 周连贵. 电子技术基础学习指导 (非电类). 北京: 机械工业出版社, 2003
- 21 Robert T. Paynter, B. J. Toby Boydell 著. 姚建红, 张秀艳译. 电子技术 (从交、直流电路到分立器件及运算放大电路). 北京: 科学出版社, 2008
- 22 Thomas L. Floyd 著. 杨棧云, 李世文, 王俊惠, 曾鸿祥译. 电子器件 (从原理分析到故障检修及系统应用). 北京: 科学出版社, 2008
- 23 汪胜宁, 程东红. 电子线路 (第四版) 教学指导书

